

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Grado en Ingeniería Eléctrica**

# **DISEÑO DE UN MOTOR SÍNCRONO CON DESPLAZAMIENTO LINEAL**



**Memoria, Planos y Anexos**

**Autor:** Juan David Romero Velásquez  
**Director:** Ramon Bargalló Perpiñà  
**Convocatòria:** Enero 2020



## Resumen

En este trabajo se ha realizado un diseño de un motor síncrono lineal de imanes permanentes. Se empieza explicando brevemente las diferentes tipologías de motores lineales. Se hace un primer dimensionamiento para poder realizar las simulaciones electromagnéticas con el programa de elementos finitos FEMM y se acaba realizando un pequeño estudio térmico, también con éste software.

Se escoge la tipología de imanes permanentes porque ofrece una alta eficiencia, así como una alta densidad de potencia (kW/l) como de potencia específica (kW/kg). En el análisis electromagnético se estudia el comportamiento del motor en vacío, y en carga. Se han realizado diferentes dimensionamientos, estudiando y analizando diferentes parámetros como: número de polos, longitud y ancho de la parte móvil, entrehierro, material del imán... Después de dicho estudio se encuentra la geometría más óptima reduciendo al máximo la fuerza de cogging, la inducción magnética y la corriente de alimentación. Para el análisis térmico, se obtienen las temperaturas del bobinado y del hierro a plena carga. Para finalizar, se añaden en los anexos los planos del motor y los códigos utilizados para la automatización de las simulaciones en FEMM.

## Resum

En aquest treball s'ha realitzat un disseny d'un motor síncron lineal de imants permanents. Es comença explicant breument les diferents tipologies de motors lineals. Es fa un primer dimensionament per poder realitzar les simulacions electromagnètiques amb el programa d'elements finits FEMM i s'acaba realitzant un petit estudi tèrmic, també amb aquest software.

S'escull la tipologia de imants permanents perquè ofereix un alta eficiència, així com una alta densitat de potència (kW/l) com de potència específica (kW/kg). En l'anàlisi electromagnètic s'estudia el comportament del motor en buit i en càrrega. S'han realitzat diferents dimensionaments, estudiant i analitzant diferents paràmetres com: nombre de pols, longitud i ample de la part mòbil, entreferro, material del imant... Després d'aquest estudi es troba la geometria més òptima reduint al màxim la força de cogging, la inducció magnètica i el corrent d'alimentació. Respecte l'anàlisi tèrmic, s'obtenen les temperatures del bobinat i del ferro a plena càrrega. Per finalitzar, s'arriba a les conclusions i en l'annex s'adjunten els plànols del motor així com els codis emprats per automatitzar les simulacions electromagnètiques.

## **Abstract**

A permanent magnet linear synchronous motor has been done in this thesis. It begins by briefly explaining the different types of linear motors. A first sizing is done to make the electromagnetic simulations using finite element program, FEMM, and it ends with a thermal analysis also using the same software.

Permanent magnet typology is chosen because of its high efficiency, high power density (kW/l) and high specific power (kW/kg). In the electromagnetic analysis a vacuum and load behaviour has been studied. A different sizing has been done, studying and analysing parameters such as: pole pairs, length and width of the armature, gap, magnet material... Then the final geometry is found optimizing and reducing the cogging force, the magnetic induction and the load current. A winding and iron temperature are obtained for the thermal analysis. Finally, there is a conclusion and then a motor planes and the codes for the automation of simulations are attached in the annexes.



## **Agradecimientos**

A mis padres y amigos por todo el apoyo recibido durante estos nueve cuatrimestres.

A Ramon Bargalló por todo lo enseñado durante la carrera y sobretodo este último cuatrimestre.







# Índice

<b>RESUMEN</b>	<b>I</b>
<b>RESUM</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1. Motivación	3
1.2. Objetivos del Trabajo	3
1.3. Alcance del trabajo	4
<b>2. ESTADO DEL ARTE DEL MOTOR LINEAL</b>	<b>5</b>
2.1. Tipos de motores lineales	5
2.2. Definición	6
2.3. Clasificación de los motores síncronos lineales	7
2.4. Tipos de excitación en las máquinas síncronas lineales	9
2.4.1. Excitación con imanes permanentes	9
2.4.2. Sistema de excitación con bobinado	11
2.5. Tipos de devanados	12
2.5.1. Devanado distribuido	12
2.5.2. Devanado concentrado	12
<b>3. METODOLOGÍA DEL DISEÑO</b>	<b>13</b>
3.1. Datos iniciales del sistema	14
3.2. Cálculo del dimensionamiento inicial	14
<b>4. ANÁLISIS NUMÉRICO ELECTROMAGNÉTICO</b>	<b>17</b>
4.1. Estudio y optimización de la distribución de los imanes	18
4.2. Estudio y optimización de la geometría del motor	20
4.3. Análisis electromagnético	28
4.3.1. Análisis en vacío	28
4.3.2. Análisis de la Fuerza de cogging	33
4.3.3. Análisis en carga, fuerza en función de la posición	35
4.3.4. Análisis en carga, fuerza en función del tiempo	36
4.4. Optimización de la fuerza de cogging	38

4.5.	Comparación del análisis electromagnético del motor con imanes juntos y con 3 milímetros de separación .....	43
4.5.1.	Análisis en vacío .....	43
4.5.2.	Análisis en la fuerza de cogging .....	46
4.5.3.	Análisis en carga en función de la posición .....	47
4.5.4.	Análisis en carga en función del tiempo .....	49
4.6.	Conclusiones .....	52
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS TÉRMICO .....</b>	<b>53</b>
<b>6.</b>	<b>PRESUPUESTO .....</b>	<b>59</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>67</b>
	<b>PLANOS .....</b>	<b>69</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>81</b>
	<b>ANEXO 1 CÓDIGOS EN LUA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LAS SIMULACIONES .....</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO 2 DATOS OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES PARA LA OBTENCIÓN DE LAS GRÁFICAS .....</b>	<b>89</b>

# Memoria





## 1. Introducción

Los motores eléctricos han tenido un papel vital en la industria desde su invención, pero durante los últimos años, con la mejora de la electrónica de potencia se ha abierto un gran abanico de posibilidades para su control. Los motores eléctricos de imanes permanentes tienen un gran interés en la industria gracias a su alta eficiencia y a su alta densidad de potencia.

Es por ello que el diseño y estudio de éstas máquinas tienen y tendrán un papel vital en la industria (vehículo eléctrico, energías renovables...) en el presente y un futuro próximo.

Ha sido por este motivo lo que me ha llevado a decidirme por realizar un diseño, estudio y análisis electromagnético para un motor lineal.

### 1.1. Motivación

Una de las principales motivaciones en escoger el grado en ingeniería eléctrica fue por las ganas que tenía en contribuir en la búsqueda de un sistema eléctrico más sostenible, pero sobre todo por la transición hacia el vehículo eléctrico. Fue en el tercer curso de la carrera, viendo asignaturas como máquinas eléctricas y electrónica de potencia, donde me di cuenta de la importancia de dichas asignaturas en el desarrollo e investigación en las tecnologías del vehículo eléctrico. Durante mi último año de carrera cursé la asignatura de diseño de máquinas eléctricas. Me pareció una asignatura muy interesante ya que con el continuo desarrollo en el vehículo eléctrico las máquinas eléctricas tienen un papel fundamental en este sector. Debido a que mi último curso estaba involucrado en un proyecto de *Formula Student* en el equipo e-Tech Racing, que es un proyecto que requiere de muchas horas de dedicación, no pude aprovechar al máximo los conocimientos que me brindaba el profesor y la asignatura. Es por lo que, al acabar mi etapa en dicho proyecto, quise realizar el trabajo de fin de grado en algo relacionado con el diseño de máquinas eléctricas.

Al comentarle mi situación a mi tutor, me ofreció la oportunidad de realizar el diseño de un motor lineal de imanes permanentes. Me pareció interesante ya que sería bueno para mi entender y aprender a diseñar, no solo máquinas rotativas, sino que también máquinas lineales.

### 1.2. Objetivos del Trabajo

El principal objetivo en la realización de dicho trabajo es la obtención del título de Ingeniero. Esto conlleva intrínsecamente, al igual que cada curso de la carrera, a enfrentarse a retos complicados, pero a la vez interesantes que ponen a prueba al estudiante. Es la superación de dichos problemas lo que

da al estudiante las capacidades necesarias para la resolución de problemas, ya que éste es el principal objetivo de un ingeniero. También superar dichos retos gratifican al estudiante.

Otro gran objetivo es la familiarización, comprensión y aprendizaje en el diseño de máquinas eléctricas. Esto significa el poder dedicarme en un futuro como ingeniero al diseño y estudio de éstas teniendo una base sólida al haber trabajado ya en un diseño como este y haber sabido interpretar los datos y comportamientos del motor en función de los parámetros que intervienen.

Es un reto la realización de dicho trabajo ya que siempre había hecho cálculos y resuelto problemas de máquinas rotativas, pero nunca lineales.

### **1.3. Alcance del trabajo**

El objetivo del trabajo es realizar un diseño de un motor lineal de imanes permanentes para satisfacer una determinada aplicación. Esta aplicación es la apertura de una puerta de ascensor. Por lo tanto, los objetivos principales del trabajo son analizar los diferentes tipos de máquinas eléctricas lineales y observar cual es la que mejor se adapta a nuestra aplicación. Estudiar y analizar el dimensionamiento de la máquina y hacer una optimización de esta para cumplir con las restricciones de diseño. Una vez obtenido el dimensionamiento óptimo, hacer un análisis del comportamiento electromagnético de la máquina y para acabar hacer un estudio térmico del motor.

Hubiera sido interesante haber hecho una etapa de fabricación de la máquina, pero debido a la falta de tiempo no se ha podido realizar dicha etapa.

## 2. Estado del arte del motor lineal

Durante varias décadas, la máquina asíncrona o de inducción ha sido por excelencia la máquina escogida en la industria como motor para servicios en régimen permanente. Cuando se requería de generación de energía, la máquina síncrona es y ha sido la más óptima para este servicio ya que la máquina asíncrona no es capaz de generar energía reactiva por si sola. Por otra parte, para un funcionamiento a velocidad variable, la mejor opción era la máquina de corriente continua debido a su fácil control debido a que se puede controlar el par y la velocidad de manera independiente. Es con el avance de la electrónica de potencia y con el crecimiento de las máquinas con imanes permanentes en los últimos años que se empieza a sustituir las máquinas de corriente continua a máquinas de corriente alterna para servicios a velocidad variable. Con este cambio se reducen drásticamente los costes de mantenimiento ya que las escobillas es una de las partes de la máquina que más problemas suelen dar y de esta manera se mejora la eficiencia.

En términos generales, se puede decir que una máquina eléctrica está constituida por dos partes. El estator que es la parte fija y el rotor que es la parte móvil. Estos se suelen fabricar con materiales ferromagnéticos, para evitar pérdidas en el hierro y se suele utilizar chapas magnéticas de acero al silicio, convenientemente ranuras para alojar en su interior los devanados correspondientes.

En estas dos partes se colocan devanados que se conocen como inductor e inducido. En el caso de las máquinas lineales, se utilizan más los términos provenientes del inglés como *armature* que es el inductor (en inglés *armature*) y *field excitation system o reaction rail* que sería el inducido. Se puede situar el inductor en la parte móvil y el inducido en la parte fija como viceversa, dependiendo de la aplicación y de la facilidad de fabricación.

Las máquinas eléctricas, rotativas, están altamente estudiadas habiendo una cantidad enorme de información, ya sean libros o artículos técnicos. Respecto a las máquinas eléctricas lineales hay mucha menos información. A continuación, se explicará brevemente los diferentes tipos de máquinas lineales poniendo especial atención en los motores síncronos lineales.

### 2.1. Tipos de motores lineales

En las máquinas lineales hay dos grandes grupos, las máquinas asíncronos o de inducción y las máquinas síncronas. Las máquinas de inducción son máquinas robustas que tienen un bajo coste de mantenimiento, pero las máquinas síncronas son máquinas que tienen un mayor rendimiento y si son de imanes permanentes tienen una alta densidad de potencia (kW/l) y potencia específica (kW/kg) que

son características muy buscadas en muchos sectores de la industria. Por lo tanto, se estudiará más detalladamente la máquina síncrona lineal.

## 2.2. Definición

Los motores síncronos lineales (LSMs) en sus siglas en inglés, la carga se mueve en sincronismo con el campo magnético, en otras palabras, la velocidad mecánica es la misma que la del campo magnético. La finalidad de dichos motores es generar una fuerza, en inglés *thrust*. Esta fuerza puede ser generada de dos maneras:

- Por la acción de un campo magnético en movimiento producido por un devanado polifásico, normalmente trifásico, y una matriz de polos magnéticos N,S...N,S (LSMs con un bobinado en ac)
- Por la acción de un campo magnético producido por conmutación electrónica a bobinados en dc y una serie de polos magnéticos N,S...N,S (motores de reluctancia conmutada).

La parte que produce el campo magnético en movimiento se conoce como inducido, *armature* en inglés. La parte que proporciona el flujo magnético en dc se conoce como sistema de excitación o rail de reacción o en inglés *reaction rail*. Tradicionalmente, los motores síncronos son motores con excitación en dc. Pero si se remplace la excitación en dc por imanes permanentes se ahorran elementos como colectores de delgas, escobillas y de esta manera se aumenta la eficiencia del sistema. Los motores lineales síncronos de imanes permanentes (PM LSMs) se pueden dividir en dos grupos:

- PM LSMs donde la forma de onda de corriente de entrada es sinusoidal.
- PM dc *linear brushless motors* (LBMs) donde la forma de onda de corriente de entrada que es rectangular o trapezoidal

Para nuestro trabajo se estudiará el motor síncrono lineal con alimentado con una onda sinusoidal. En el caso de LSMs operando con el principio de campo magnético en movimiento, la velocidad lineal se expresa con la siguiente ecuación:

$$v = 2f\tau \quad (\text{Eq. 2.1})$$

donde:

v es la velocidad lineal.

f es la frecuencia de alimentación.

$\tau$  es el paso diametral o en inglés *pole pitch*.



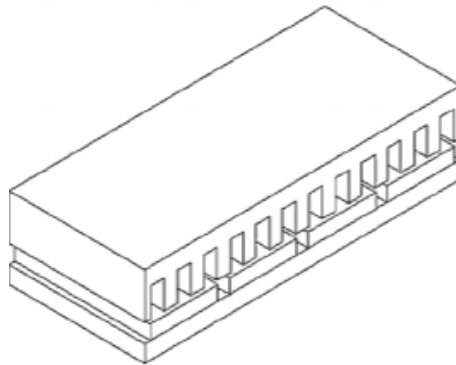
## 2.3. Clasificación de los motores síncronos lineales

Los motores síncronos lineales se pueden clasificar dependiendo si son:

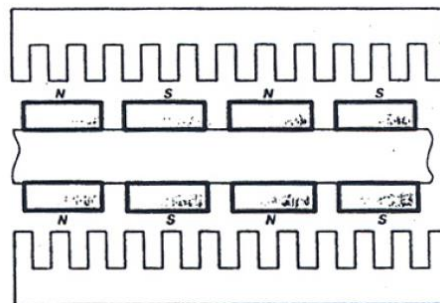
- Planos o Tubulares
- De una o de doble cara (*Single sided o Double Sided*)
- Con ranura o sin ranura (*Slotted o slotless*)
- Con núcleo de hierro o aire (*Iron cored o air-cored*)
- De flujo transversal o de flujo longitudinal

Uno de los aspectos que los diferencia es su forma. Los más comunes son los planos de una cara, tubulares y los de flujo transversal.

La estructura plana es la más sencilla y también la más utilizada en los motores comerciales. Este tipo de motor consta de dos partes, la armadura o primario, donde se coloca el devanado y el rail o secundario donde se encuentran los imanes. Los motores de doble cara consisten en dos armaduras externas en forma de U y una excitación interna.

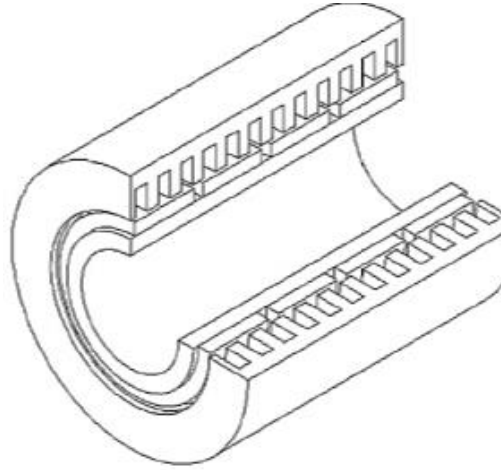


**Figura 2.1.-** Motor lineal plana de una cara. [1]



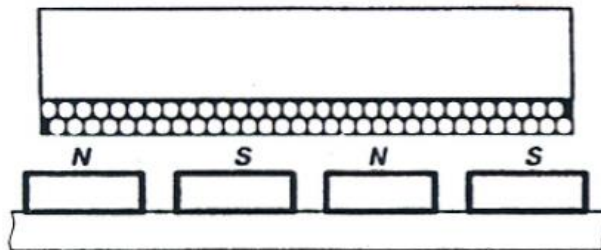
**Figura 2.2.-** Motor lineal de doble cara. [2]

Como explica Jorge Jiménez en su tesis doctoral [3], los motores tubulares constan de un eje común y tanto el primario como secundario son cilíndricos. La principal ventaja de este tipo de geometría es que, debido a la geometría de revolución, los esfuerzos radiales se reducen notablemente.



**Figura 2.3.-** Motor lineal tubular. [1]

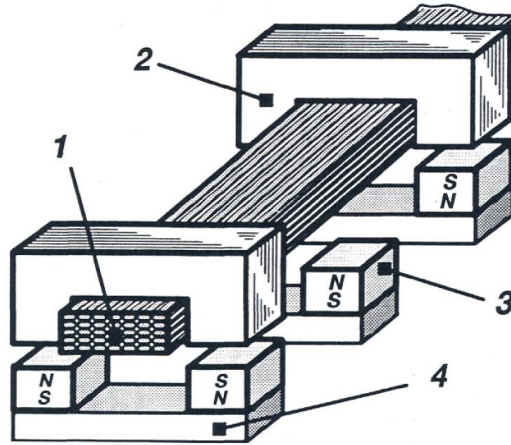
En los motores sin ranura (slotless) el bobinado del primario se distribuye uniformemente en un núcleo de armadura lisa o sin ningún núcleo. Estos motores no tienen ningún tipo de fuerza de cogging, que es una fuerza que se genera debido a la interacción entre los imanes y las ranuras, y para altas frecuencias pueden alcanzar grandes eficiencias. Como desventaja, al tener distancias en el entrehierro mayores se requieren imanes de mayor tamaño y, por lo tanto, el precio de la máquina aumenta.



**Figura 2.4.-** Motor lineal sin ranura (slotless). [2]

Los motores *iron-cored* son motores que disponen de un núcleo de hierro. Pueden soportar flujos mayores que los motores sin núcleo de hierro.

En los motores de flujo magnético longitudinal las líneas se encuentran en el plano paralelo a la dirección del campo magnético. En cambio, los motores de flujo magnético transversal las líneas del flujo magnético son perpendiculares a la dirección del campo magnético.



**Figura 2.5.-** Motor lineal de flujo transversal. [2]

## 2.4. Tipos de excitación en las máquinas síncronas lineales

En el apartado anterior se han descrito brevemente las diferentes tipologías de motores según su forma. En este apartado se explicarán los diferentes métodos de excitación. Los tipos de motores mencionados arriba son válidos para cualquier tipo de excitación.

Los tipos de excitación se puede clasificar en estos grupos:

- Excitación con imanes permanentes
- Excitación con bobinado.
- Sistema de excitación superconductora.

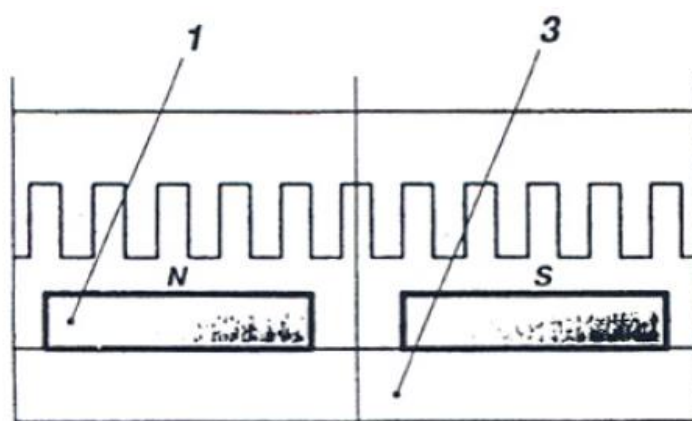
En el pasado, la excitación con bobinado era la más usada ya que los imanes permanentes tenían un alto coste, pero en los últimos años su precio se ha reducido notablemente generando un gran interés en este tipo de excitación. Respecto al sistema de excitación superconductora es una tecnología compleja y poco madura y aún está en proceso experimental y de mejora. Por lo tanto, nos centraremos en el modo de excitación con imanes permanentes.

### 2.4.1. Excitación con imanes permanentes

Como se ha mencionado anteriormente, la gran ventaja de esta configuración es la gran densidad de fuerza que ofrece. Pero dentro de este modo de excitación existen tres tipos de configuraciones.

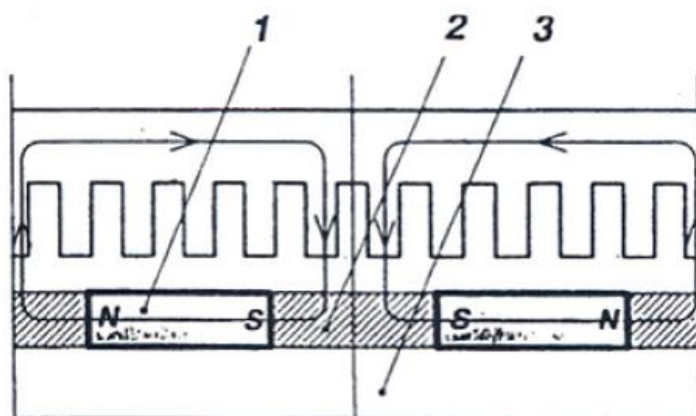
- Imanes permanentes superficiales
- Imanes permanentes enterrados o embebidos
- Imanes permanentes tipo Halbach

En la configuración superficial los imanes están magnetizados en la dirección normal al entrehierro (perpendicular a la superficie activa) y están dispuestos sobre un yugo de material ferromagnético.



**Figura 2.6.-** Motor lineal con imanes superficiales. [2]

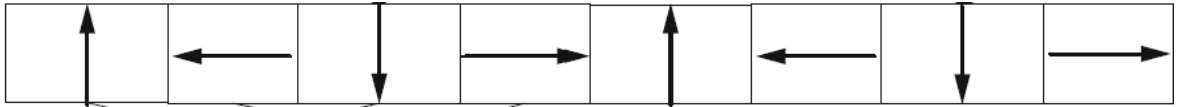
La siguiente configuración es la de imanes enterrados del inglés *buried*. Los imanes permanentes enterrados o embebidos están magnetizados en la dirección del campo magnético móvil, y el yugo es de material no-ferromagnético.



**Figura 2.7.-** Motor lineal con imanes enterrados o embebidos. [2]

La tercera disposición es la de imanes en Halbach que genera una excitación de flujo magnético más fuerte y más cerca de la forma sinusoidal que una disposición normal. La dirección de magnetización

sigue el patrón Norte-Oeste-Sur-Este como se muestra en la figura 2.8. Además, no requiere de ningún yugo ferromagnético.



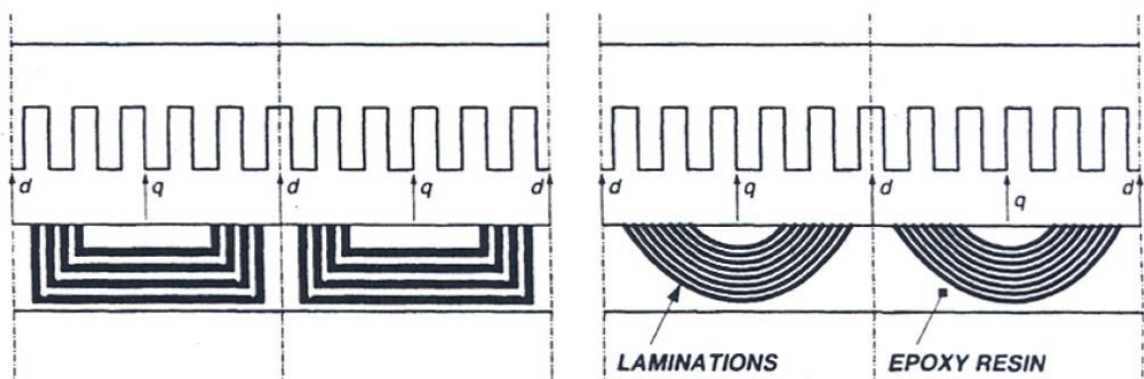
**Figura 2.8.** Motor lineal con imanes en configuración halbach. [4]

Todas las configuraciones mencionadas anteriormente forman parte de (*active reaction rail*) que son los imanes que se encuentran en el rail o secundario. Pero también existe la posibilidad que los imanes se encuentren en la armadura, (*passive reaction rail*). Los imanes permanentes en el rail de reacción (activo) tienen la desventaja que para grandes recorridos hace falta una gran cantidad de imanes aumentando el coste de fabricación. Por eso está la configuración de situar los imanes en la armadura para abaratar costes. Esta configuración se conoce como motor síncrono lineal homopolar.

#### 2.4.2. Sistema de excitación con bobinado

El sistema de excitación con bobinado es similar al de un motor síncrono rotatorio de polos salientes. La excitación se genera a partir de bobinas alimentadas en corriente continua. Si el sistema de excitación está integrado en la parte móvil la corriente puede llegar por escobillas o barras de contacto, por sistemas de transferencia de potencia por inducción, por transformadores lineales o por excitadores lineales sin escobillas.

El motor de reluctancia variable entrega una densidad de fuerza menor y en motores lineales su utilización no está muy extendida. Estos motores se pueden optimizar utilizando barreras de flujo o laminación de acero.



**Figura 2.9.-** Motor lineal de reluctancia variable, a la izquierda barreras de flujo, a la derecha laminaciones de acero. [2]

## 2.5. Tipos de devanados

Se denomina devanado de una máquina eléctrica a los arrollamientos del inductor y del inducido. El material que se utiliza suele ser el cobre. También se suele utilizar el aluminio, pero su aplicación es casi exclusiva para los motores de inducción de jaula de ardilla.

Dependiendo del número de ramas de bobina existente en una ranura, los devanados se clasifican en devanados de simple capa o de doble capa. En el arrollamiento de simple capa, en cada ranura se sitúa un solo lado de la bobina, mientras que en el de doble capa; se sitúan dos lados de bobina por ranura.

También se pueden clasificar dependiendo si el devanado es distribuido o concentrado.

### 2.5.1. Devanado distribuido

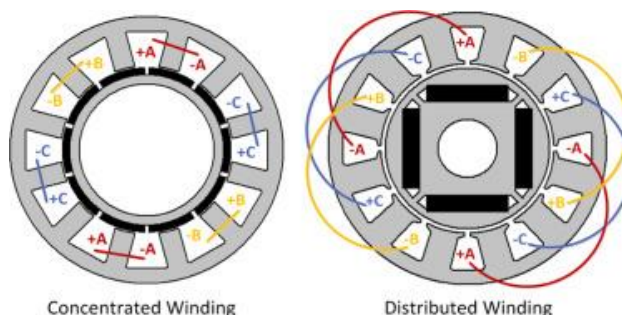
El devanado distribuido es muy utilizado en motores rotativos. Según Chevailler [7] el devanado distribuido es aquel en el que el número de ranuras por polo y fase es igual o mayor a 0,5. Los devanados distribuidos de paso entero ( $q = 1$ ) basan su diseño en la siguiente secuencia:

$$A^+ | C^- | B^+ | A^- | C^+ | B^- |$$

Pero para motores lineales, este tipo de devanados puede presentar una distribución de campo asimétrico. En general, estos devanados presentan cabezas de bobina de gran tamaño y volumen, motivo por el cual son muy poco utilizados en motores lineales. (J. Jiménez 2013 [3]).

### 2.5.2. Devanado concentrado

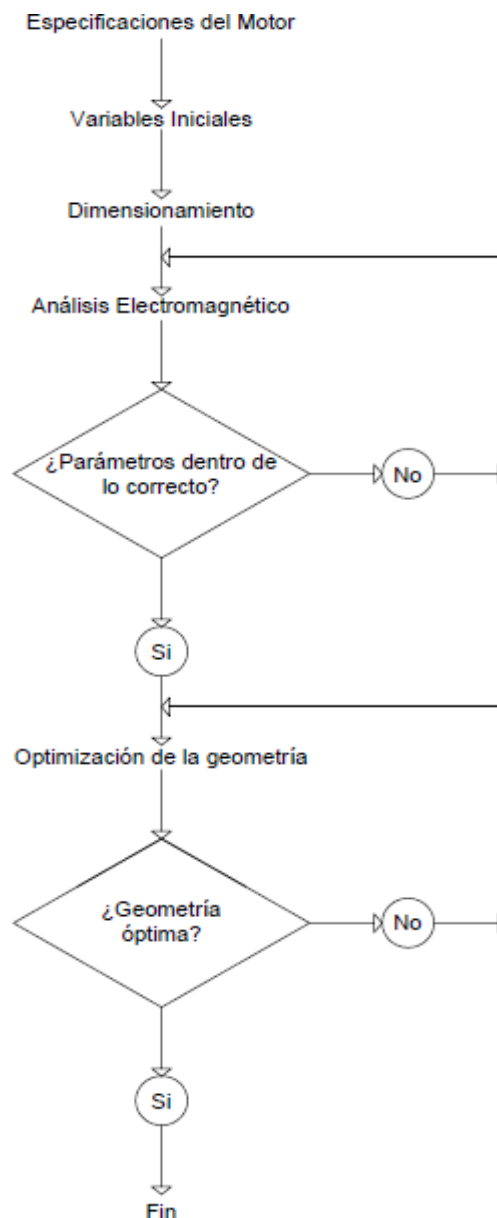
El devanado concentrado es aquel en el que el número de ranuras por polo y fase es menor o igual a 0,5. También se conoce como *non-overlapping winding* ya que las bobinas no presentan solapamiento en las cabezas de bobina. En comparación con la distribución de bobinado distribuido, no necesita añadir dientes adicionales para albergar el devanado. (J. Jiménez 2013 [3]).



**Figura 2.10.-** Diferentes tipos de devanados, a la izquierda devanado concentrado y a la derecha devanado distribuido. [8]

### 3. Metodología del diseño

El principal objetivo del trabajo es el diseño de un motor lineal para la apertura de una puerta de ascensor. Es posible realizar el diseño a partir de expresiones analíticas pero debido a la complejidad de las ecuaciones, el análisis electromagnético se hará mediante simulación numérica. A partir de los datos de partida y de las restricciones del sistema, se hace una primera aproximación de las dimensiones del motor. La metodología o algoritmo de diseño seguido en este trabajo es el que se muestra en la siguiente figura:



**Figura 3.1.-** Algoritmo seguido para el diseño del motor lineal. [Fuente propia]

### 3.1. Datos iniciales del sistema

Las especificaciones o datos de partida del sistema son los mostrados en la siguiente tabla. Una de las restricciones es que la máquina está accionada por un ondulator y éste solo puede entregar una tensión de fase máxima de 127 V. Respecto a la masa y al volumen del motor no se especifica nada, aun así, se intentara hacer el diseño optimizando al máximo dichos parámetros.

Tabla 3.1.- Especificaciones del motor.

Especificación	
<b>Fuerza nominal (N)</b>	80
<b>Fuerza máxima (N)</b>	200
<b>Velocidad nominal (m/s)</b>	1
<b>Velocidad máxima (m/s)</b>	2
<b>Voltaje máximo de fase (V)</b>	127

### 3.2. Cálculo del dimensionamiento inicial

A continuación, se mostrarán las ecuaciones utilizadas para la primera iteración del dimensionamiento del motor. En una máquina rotativa, el par es proporcional al volumen de la máquina. Esto significa que para grandes pares mayor será el diámetro de la máquina.

El paso diametral es un parámetro muy importante. En una máquina rotativa el paso diametral depende del perímetro de la máquina y de los pares de polos. Pero en una máquina lineal, el paso diametral o *pole pitch* en inglés se puede expresar de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{L}{2p} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

donde:

L es la longitud de la máquina lineal.

2p son los pares de polos de la máquina.

Observando las ecuaciones 2.1 y 3.1, la velocidad mecánica de un motor lineal depende de la frecuencia de alimentación e indirectamente de los pares de polos.



La velocidad nominal requerida es de 1 m/s y suponiendo una frecuencia de alimentación de 10 Hz, ya que el motor al ser accionado por un ondulador se puede alimentar a la frecuencia deseada, se hace un primer cálculo del *pole pitch* aislando la ecuación 3.1:

$$\tau = \frac{v}{2f} = \frac{1}{2 \cdot 10} = 0,05 \text{ m} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Utilizando este primer cálculo y suponiendo que el motor cuenta con 2 pares de polos  $2p = 2$  se calcula la longitud del motor a partir de la ecuación 3.1:

$$L = \tau 2p = 0,05 \cdot 4 = 0,2 \text{ m} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

De esta manera se tiene una primera aproximación de la longitud del motor.

Utilizando la expresión que Jorge Jiménez encuentra en su tesis doctoral [3], se puede calcular la superficie activa del motor a partir de la expresión siguiente:

$$S = L \cdot W = \frac{F_N \pi k_f}{2,22 \cdot \xi B_{gap} A} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Donde:

L es la longitud del motor.

W es el ancho del motor.

$F_N$  es la fuerza de salida.

$k_f$  es el factor de forma de la inducción en el entrehierro.

$\xi$  es el factor de bobinado.

$B_{gap}$  es la inducción máxima en el entrehierro del motor.

A es la carga lineal específica.

La longitud del motor se ha calculado en la sección anterior mediante la ecuación 3.3. La fuerza nominal es un parámetro inicial conocido. El factor de forma se coge como valor 1,2 a partir del libro de Gieras y Piech [2]. El factor de bobinado se estima como 1 para esta primera iteración.  $B_{gap}$  se coge un valor de 0,7 T y A se calcula a partir de la siguiente expresión tomada por Corrales sacada de la tesis doctoral de Jiménez [3].

$$A = 3 \cdot 18852 \cdot \left(\frac{P_{out}}{1000}\right)^{0,1634} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Utilizando los valores mencionados en el párrafo anterior se obtiene un primer valor de superficie:

$$S = \frac{80 \cdot \pi \cdot 1,2}{2,22 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 37432} = 0,005616 \text{ m}^2 \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Habiendo obtenido una primera iteración de la longitud y de la superficie del motor se puede calcular el ancho del motor a partir de la ecuación 3.4:

$$W = \frac{S}{L} = \frac{0,005616}{0,2} = 0,028 \text{ m} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

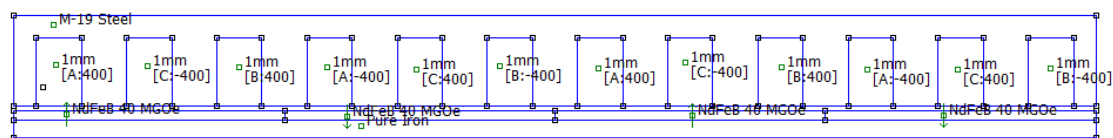
## 4. Análisis Numérico Electromagnético

Una vez obtenidos los cálculos para un primer dimensionamiento se procede a realizar el análisis electromagnético. Como primera iteración y para un diseño mecánico más fácil se utiliza un devanado distribuido con la configuración más simple. Se cambia el *pole pitch* a 60 milímetros para que cada polo cubra 3 fases eléctricas. La longitud de la máquina pasa a ser de 240 milímetros y el ancho del motor es, por lo tanto, de 23,4 milímetros.

Tabla 4.1.- Parámetros para el primer dimensionamiento del motor

Parámetros	
<b>Pole Pitch (mm)</b>	60
<b>Longitud (mm)</b>	240
<b>Ancho (mm)</b>	23,4
<b>Altura de la parte móvil (mm)</b>	20
<b>Pares de polos</b>	2
<b>Altura del yugo (mm)</b>	5

El programa seleccionado para hacer el análisis electromagnético es FEMM. Este programa de elementos finitos permite calcular y hacer estimaciones de una amplia variedad de parámetros eléctricos.



**Figura 4.1.-** Primera iteración del dimensionamiento del motor síncrono lineal de simple capa y con bobinado distribuido a estudiar. [Fuente propia]

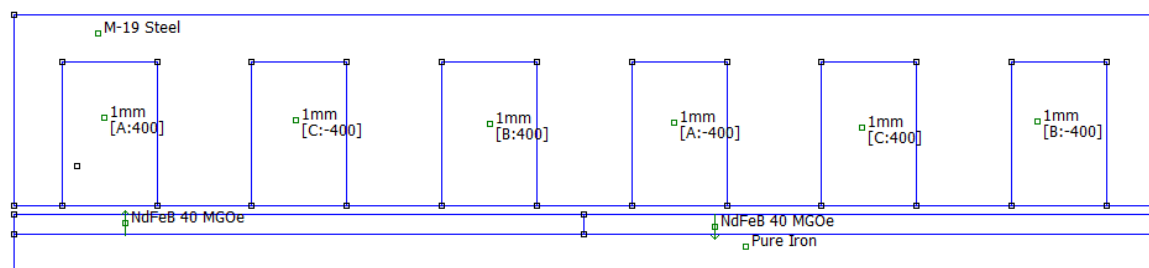
Como se observa en la figura 4.1, y siguiendo las recomendaciones del tutor, se escoge para la chapa el acero M-19 ya que es un acero muy utilizado. También como primera aproximación, la sección de

los conductores de cobre será de 1 mm y el número de espiras por fase será de 400. El entrehierro es de 1 mm y los imanes permanentes son de neodimio-hierro -boro que tienen una fuerza de atracción 75 veces superiores a la magnetita. Se observa también que se ha optado por una distribución de imanes superficiales con la dirección de magnetización Norte-Sur.

#### 4.1. Estudio y optimización de la distribución de los imanes

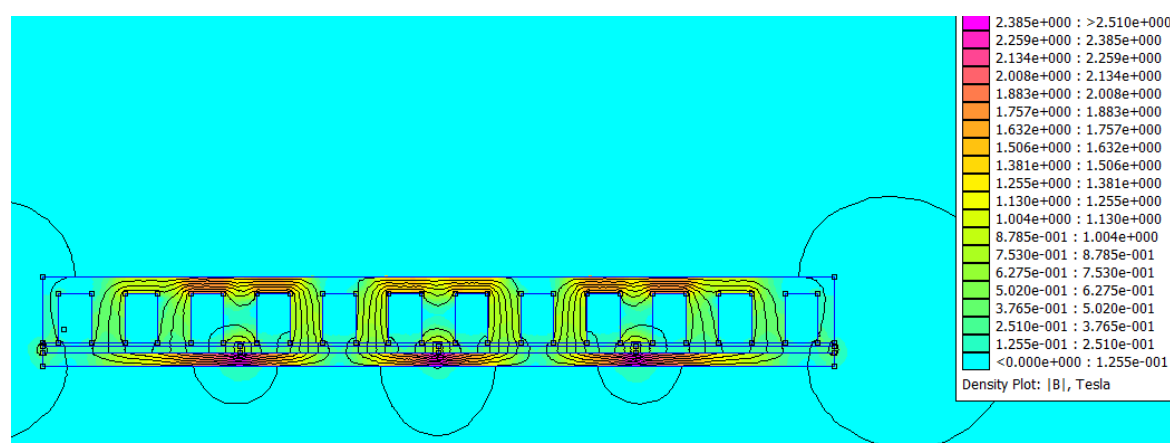
Primero se analizará que distribución de imanes es la más idónea para el motor. Se empezará por los imanes superficiales con dirección de magnetización Norte-Sur y luego con dirección Este-Oeste. Las distribuciones con imanes embebidos y en halbach se descartan ya que los procesos de montajes son costosos y complicados de montar.

Primero se empieza con los imanes superficiales con dirección Norte-Sur.



**Figura 4.2.** Dirección de magnetización de los imanes. [Fuente propia]

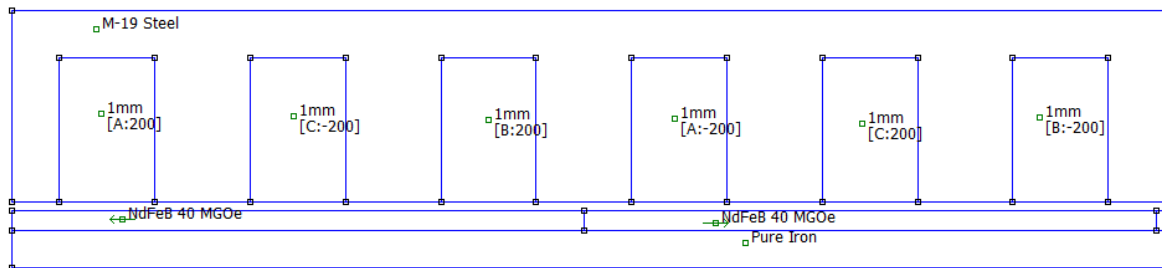
Se hace el cálculo en Femm y se obtiene el siguiente resultado:



**Figura 4.3.-** Comportamiento electromagnético para la configuración de imanes Norte-Sur, inducción máxima 2,5 T. [Fuente propia]

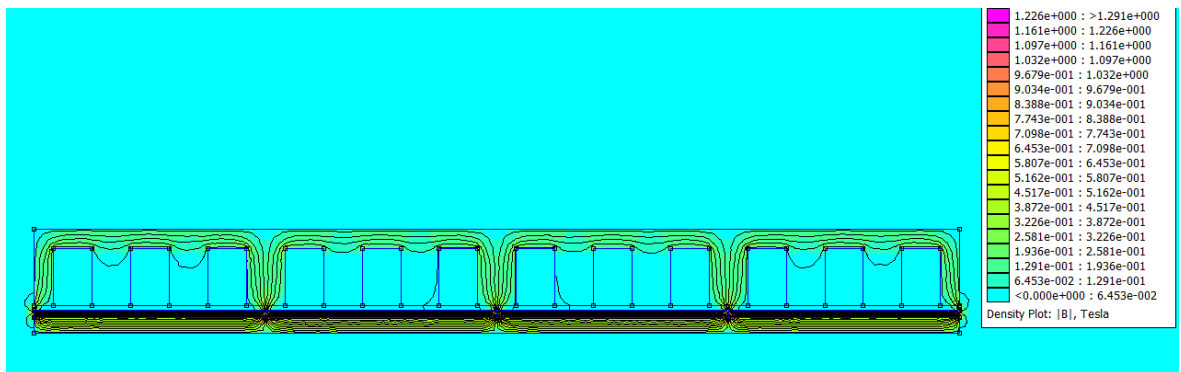
Se observa en la figura 4.3 como la inducción magnética llega hasta los 2,5 T. A la vista de los resultados se decide cambiar la orientación de los imanes.

En la figura 4.4 se observa cómo se cambia la dirección de magnetización de los imanes.



**Figura 4.4.-** Dirección de magnetización de los imanes Este-Oeste. [Fuente propia]

Se hace la simulación y se obtiene lo siguiente:



**Figura 4.5.-** Comportamiento electromagnético para la configuración de imanes Norte-Sur, inducción máxima 1,29 T. [Fuente propia]

En la figura 4.5 se puede apreciar como al cambiar la dirección de magnetización de los imanes la inducción mejora notablemente hasta el punto de bajar a los 1,2 T. Todas estas simulaciones se han hecho en vacío.

Ahora se compara que distribución de imanes da más fuerza alimentando el motor con corriente.

Tabla 4.2.- Análisis de la dirección de magnetización Norte-Sur, Este-Oeste

Corriente Ia (A)	Imanes (Norte-Sur)	Imanes (Este-Oeste)
	Fuerza (N)	Fuerza (N)
0	0	0
3	21,18	-0,44
12	39,8	-6,9
32	80	-1,24

Se observa como para la distribución de imanes con dirección Norte-Sur se obtiene mucha más fuerza que para la distribución Este-Oeste. Aun así, se requiere de mucha corriente para dar la fuerza necesaria. A continuación, se presentará el proceso de optimización de la geometría una vez seleccionada la distribución Norte-Sur.

## 4.2. Estudio y optimización de la geometría del motor

En una primera iteración, se ha realizado el cálculo con 2 pares de polos. Como se observa en la figura 4.3 para la distribución Norte y Sur la inducción es muy elevada. Para reducir esta inducción lo que se ha hecho es aumentar el número de polos, aumentar el entrehierro y también aumentar la altura o geometría del yugo.

El número de ranuras será 9, se aumenta el número de polos a 12 y por lo tanto, cambia el *pole pitch* a 15 milímetros. La nueva longitud del motor será por lo tanto de 180 milímetros y el ancho de 31,6 milímetros. También se pasa a un bobinado concentrado de doble capa ya que con el devanado distribuido se utiliza y malgasta mucho cobre y, por lo tanto, hay más pérdidas en el cobre. El bobinado concentrado tiene la siguiente secuencia:

A | -A B | -B C | -C A | -A B | -B C | -C A | -A B | -B C | -C

Tabla 4.3.- Parámetros de la segunda iteración.

Parámetros	
<b>Pole Pitch (mm)</b>	15
<b>Longitud (mm)</b>	180
<b>Ancho (mm)</b>	31,5
<b>Altura de la parte móvil (mm)</b>	20
<b>Pares de polos</b>	6
<b>Altura del yugo (mm)</b>	5

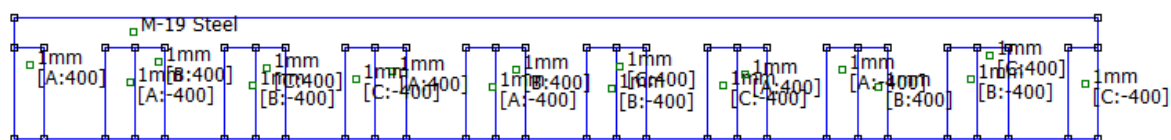


Figura 4.6.- Armature o parte móvil del segundo dimensionamiento. [Fuente propia]

En la figura siguiente se muestra el yugo con los imanes superficiales.

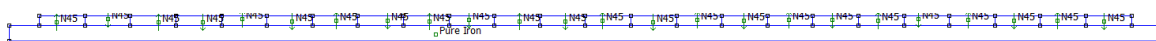
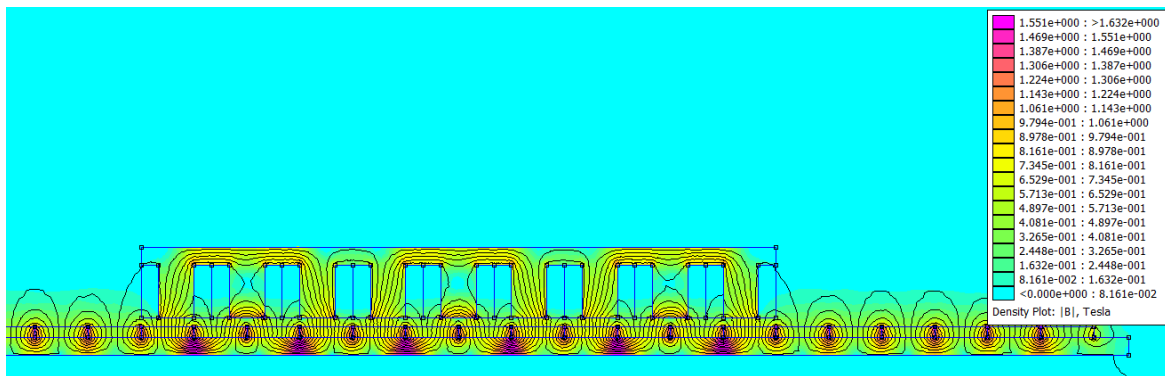


Figura 4.7.- Rail de reacción o secundario del segundo dimensionamiento. [Fuente propia]

El yugo del motor o rail de reacción, es mucho más largo que la parte móvil ya que si no hay imanes no se puede generar el campo magnético móvil.

A continuación, se muestra la simulación en vacío para esta distribución:



**Figura 4.8.-** Comportamiento electromagnético para la segunda iteración, inducción máxima 1,6 T. [Fuente propia]

Se puede observar como al aumentar los pares de polos y cambiar las dimensiones de la máquina la inducción magnética ha caído de los 2,5 T a los 1,6 T. También se observa que las zonas donde se cambia de imane es donde más se satura la máquina.

No sabemos si el campo creado por los imanes está en fase con el campo creado por el corriente de la *armature*. Por lo tanto, se tiene que mover la *armature* o parte móvil para ver cuál es el punto óptimo donde el motor entrega más fuerza.

$$F = K B_{\text{imanes}} B_{\text{Corriente}} \sin(\gamma) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Donde

F es la fuerza electromagnética.

$B_{\text{imanes}}$  es el campo magnético creado por los imanes permanentes.

$B_{\text{corriente}}$  es el campo magnético creado por la corriente al circular por el bobinado del primario.

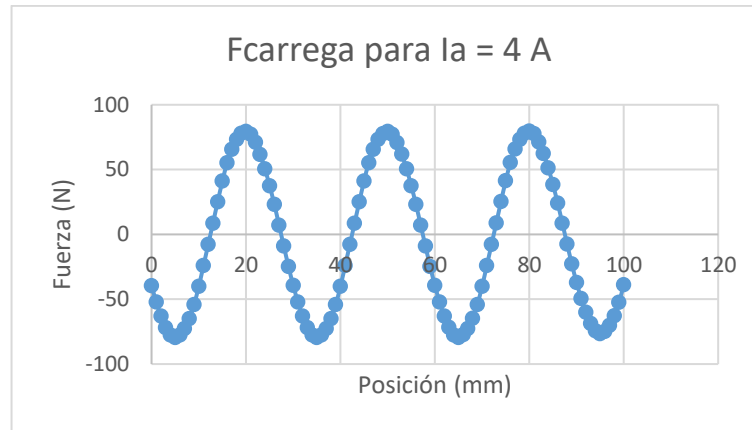
$\gamma$  es el ángulo de desfase ente el campo creado por los imanes y el campo creado por la corriente.

Por lo tanto, para que la fuerza sea máxima, el ángulo  $\gamma$  tiene que tener un valor de 90 °.

Para encontrar el punto óptimo de fuerza se mueve el primario hasta encontrar el punto que dé más fuerza. Para realizar esto, Femm permite automatizar cálculos y simulaciones a partir de la consola Lua. En el Anexo 1 se añade el código utilizado para dicha función.

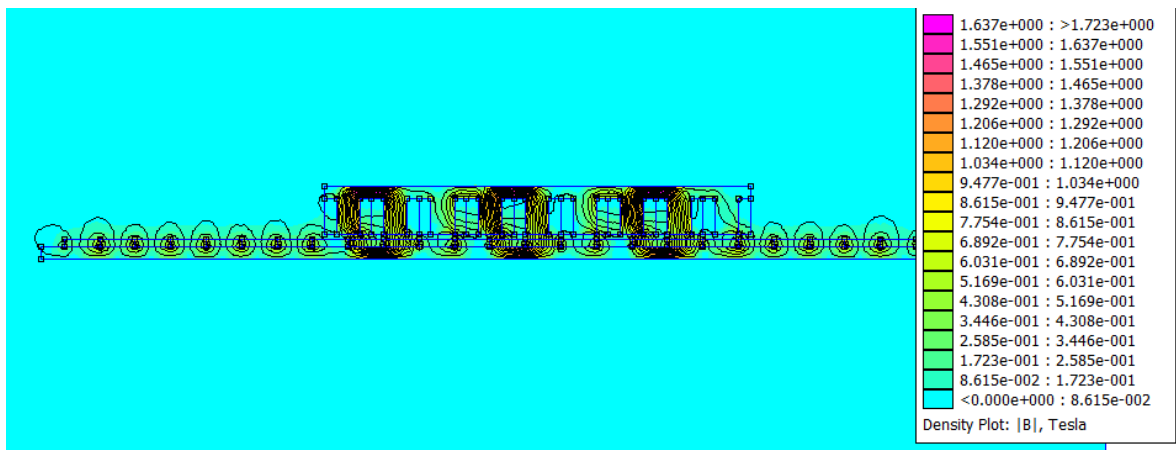
A continuación, se encuentra que para la posición  $x = 20$ , la fuerza es máxima como se aprecia en la siguiente figura:





**Figura 4.9.-** Análisis de la fuerza en función de la posición alimentando el motor a 4 A para la determinación la posición de fuerza máxima. [Fuente propia]

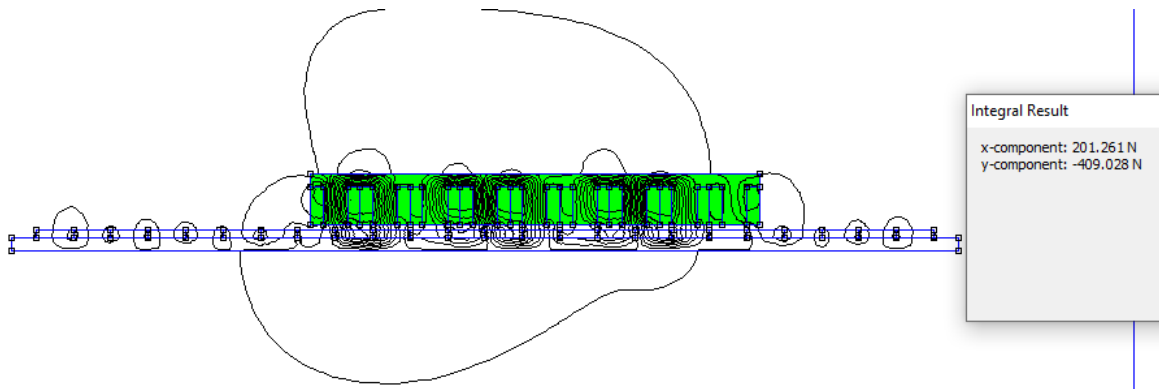
El problema es que para una corriente de 4 A se obtiene la fuerza nominal requerida, pero la inducción magnética sigue siendo bastante elevada:



**Figura 4.10.-** Comportamiento electromagnético para la segunda iteración, @  $I = 4$  A, inducción máxima 1,72 T. [Fuente propia]

Como se observa en la figura 4.10, la inducción magnética obtiene un valor de 1,7 T y la máquina ha de poder llegar a los 200 N como fuerza máxima.

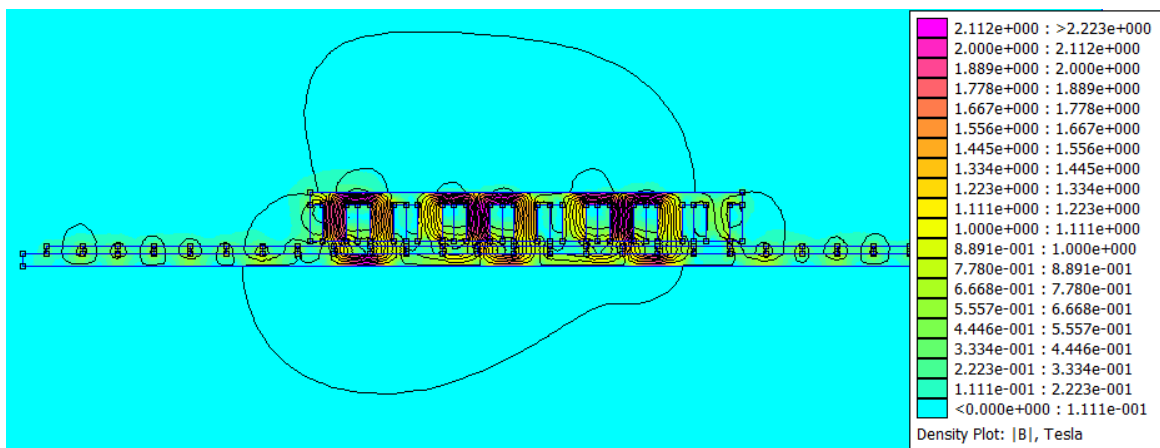
Alimentando la máquina a 16 A se obtiene la fuerza máxima como se observa en la siguiente imagen:



**Figura 4.11.-** Cálculo de la fuerza máxima en la posición óptima, @  $I = 16$  A. [Fuente propia]

Femm tiene la opción de calcular una integral de bloque y de esta manera obtener la fuerza lineal que hace la máquina en ese punto. Se observa en la figura 4.11 como se llega a los 200 N para el bloque seleccionado.

A continuación, se muestra el mapa electromagnético para dicha carga:



**Figura 4.12.-** Comportamiento electromagnético para la segunda iteración, @  $I = 4$  A, inducción máxima 2,22 T. [Fuente propia]

La máquina se satura entre los bobinados llegando a magnitudes inaceptables, por encima de los 2 T. Por lo tanto, este dimensionamiento no es válida y hay que seguir optimizando la geometría del motor.

Después de hacer una cantidad de iteraciones cambiando y comparando parámetros tales como

- Distancia del entrehierro
- Tipo de imán permanente
- Inducción magnética
- Fuerza electromagnética

Se obtiene una geometría casi definitiva. Se cambia la longitud del motor a una longitud de 144 milímetros, el ancho de la máquina será de 39 milímetros, el pole pitch pasa a ser de 12 milímetros y el entrehierro tiene un valor de 1,5 milímetros. También se aumenta la altura de la armadura de 20 a 22 milímetros y la altura del yugo de 5 a 7 milímetros. Se cambia los imanes de neodimio –hierro- boro por imanes de neodimio sinterizados. Los valores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.4.- Parámetros para la tercera iteración.

Parámetros	
<b>Pole Pitch (mm)</b>	12
<b>Longitud (mm)</b>	144
<b>Ancho (mm)</b>	39
<b>Altura de la parte móvil (mm)</b>	22
<b>Pares de polos</b>	6
<b>Altura del yugo (mm)</b>	7

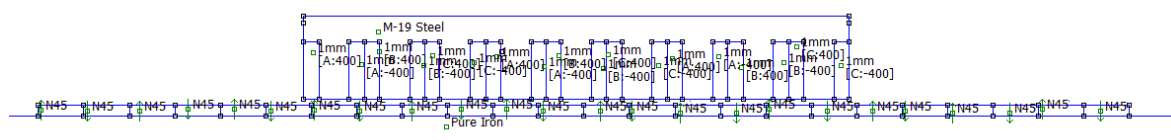


Figura 4.13.- Tercera iteración del dimensionamiento del motor síncrono lineal. [Fuente propia]

A continuación, se mostrarán los diferentes datos obtenidos cambiando el entrehierro de la máquina y el material del imán. Los primeros datos se hacen alimentando el motor a 4 amperios y utilizando el imane NdFeB 10 (*bondered*). Con el objetivo de obtener los 200 N para la carga más baja y con una inducción los más baja posible.

Tabla 4.5.- Datos obtenidos para NdFeB 10 (bonded) @ 4 A; posición de fuerza máxima.

Entrehierro (mm)	Inducción magnética (T)	Fuerza (N)
1	1,77	139
1,5	1,76	117,8
2	1,54	100

Se observa como al aumentar la distancia del entrehierro se reduce la inducción, pero la fuerza también decrece. Veamos qué pasa con otro material.

Tabla 4.6.- Datos obtenidos para NdFeB 52 (bonded) @ 4 A; posición de fuerza máxima.

Entrehierro (mm)	Inducción magnética (T)	Fuerza (N)
1	1,75	302
1,5	1,76	259
2	1,54	222

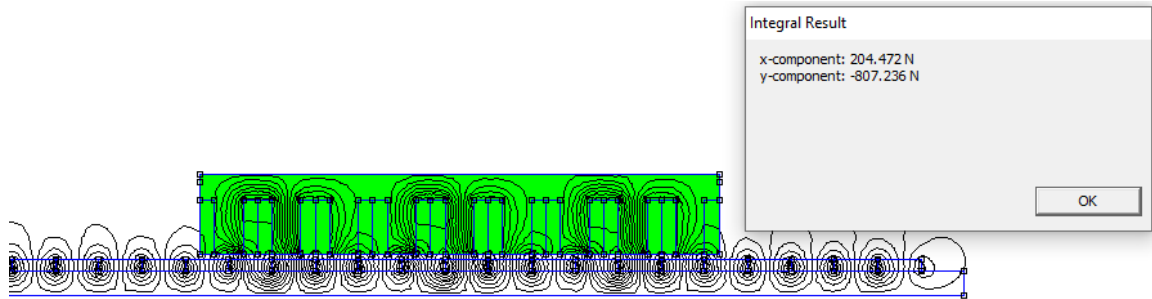
Se observa que el imán NdFeB 52 al tener una coarcedidad más elevada se obtiene una fuerza más elevada. Vemos que pasa con el imán sinterizado N45.

Tabla 4.7.- Datos obtenidos para N45 (sinterizado) @ 4 A; posición de fuerza máxima.

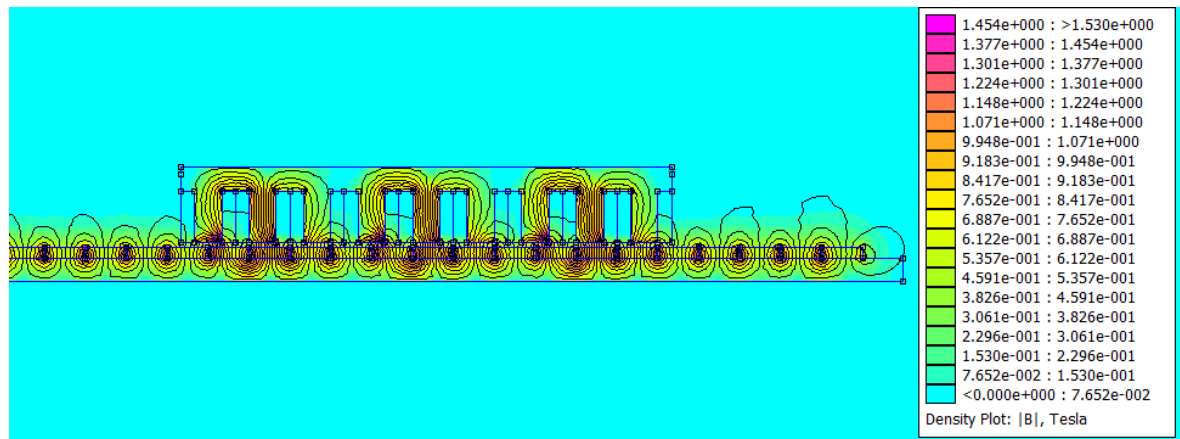
Entrehierro (mm)	Inducción magnética (T)	Fuerza (N)
1	1,44	534
1,5	1,4	445
2	1,34	377

Se observa claramente como el imán N45 entrega mucha más fuerza que los otros imanes. Se elige por lo tanto el imán N45 y un entrehierro de 1,5 mm ya que es el equilibrio entre fuerza e inducción magnética.

Nuestra aplicación requiere de 200 N como fuerza máxima. Para conseguir esta fuerza se requiere alimentar el motor a 1,8 amperios. A continuación, se observa en las figuras siguientes la fuerza y la inducción para la posición de máxima fuerza.

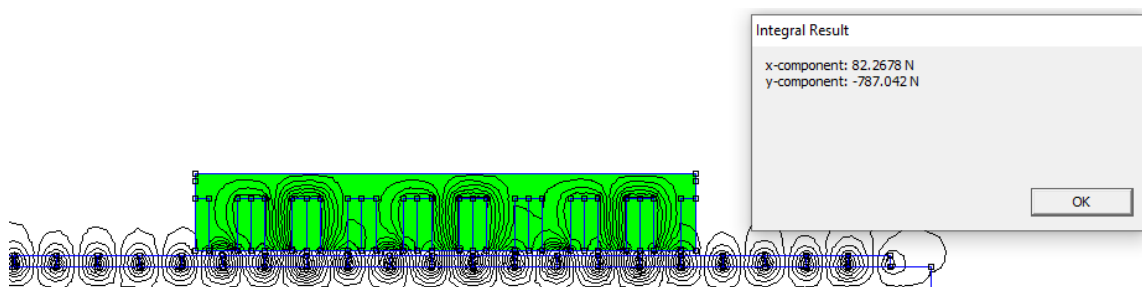


**Figura 4.14.-** Cálculo de la fuerza máxima en la posición óptima, @  $I = 1,8$  A. [Fuente propia]

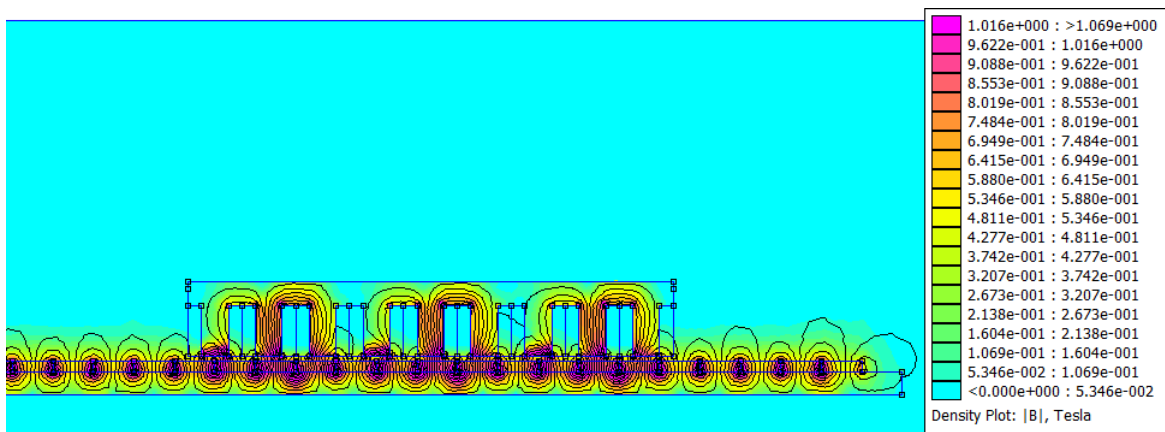


**Figura 4.15.-** Comportamiento electromagnético para la tercera iteración, @  $I = 1,8$  A, inducción máxima 1,53 T. [Fuente propia]

Para obtener la fuerza nominal, se necesita alimentar el motor a 0,7 A. Como se observa en la figura siguiente, para la posición óptima y alimentando el motor a la corriente mencionada, se obtiene la fuerza nominal requerida.



**Figura 4.16.-** Cálculo de la fuerza nominal en la posición óptima, @  $I = 0,7$  A. [Fuente propia]



**Figura 4.17.-** Comportamiento electromagnético para la tercera iteración, @  $I = 0,7$  A, inducción máxima 1,07 T. [Fuente propia]

Por lo tanto, las dimensiones finales del motor son las mostradas en la tabla 4.4.

Los materiales utilizados son los siguientes

- Acero M19 para la parte móvil.
- Cobre de 1 mm y 400 espiras por fase para los conductores.
- Neodimio-Hierro-Boro sinterizado (N45) para los imanes permanentes.

Una vez obtenido una geometría que cumple con las restricciones del diseño se procede a hacer todo el análisis electromagnético.

### 4.3. Análisis electromagnético

El análisis electromagnético se divide en cuatro partes:

- Análisis en vacío
- Análisis de la fuerza de cogging
- Análisis en carga, fuerza en función de la posición
- Análisis en carga, fuerza en función del tiempo

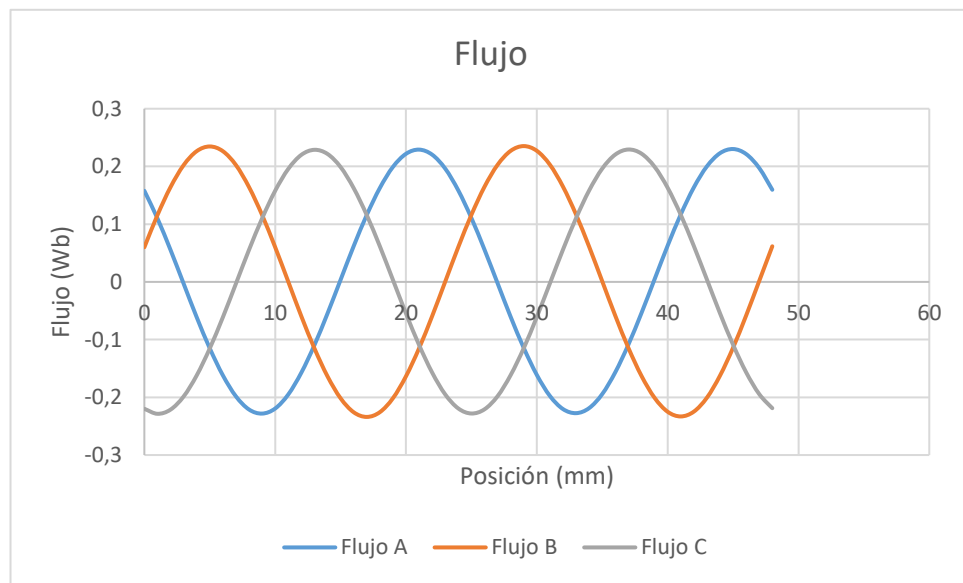
#### 4.3.1. Análisis en vacío

Tanto para el análisis en vacío como para el resto de simulaciones se han realizado automatizando éstas. Se ha utilizado el programa FEMMed que es complementario a FEMM y, por lo tanto, no tendrá

que dar problemas siempre y cuando no haya errores en el código. En el anexo 1 se adjuntan todos los códigos utilizados para los análisis en vacío y en carga.

En el análisis en vacío, se estudia el comportamiento electromagnético del motor para una corriente 0. A partir de este estudio, se obtienen los flujos A, B, C del motor y con estos, se obtiene la fuerza electromotriz.

Mediante la herramienta de cálculo Excel se pueden graficar los tres flujos. Los datos utilizados para graficar las siguientes figuras de adjuntan en el anexo 2.



**Figura 4.18.-** Análisis en vacío, flujo magnético en función de la posición. [Fuente propia]

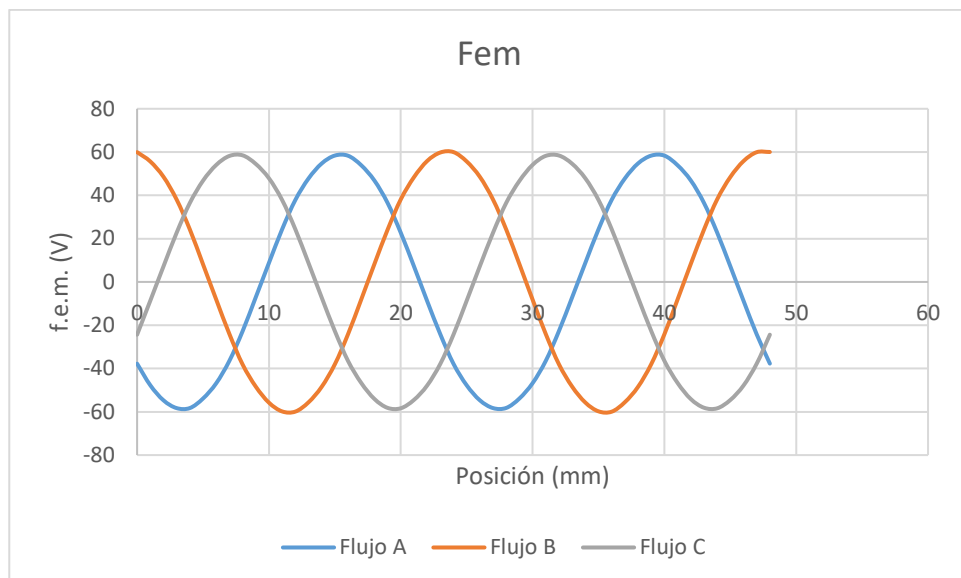
Como se ve en la imagen anterior, se puede observar como las formas de onda son totalmente sinusoidales.

Para poder calcular y graficar la fuerza electromotriz hace falta calcular el diferencial de flujo y después multiplicar por la velocidad. El diferencial de flujo se aproxima de la siguiente manera:

$$e = - \frac{d\lambda}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \cong \frac{\Delta\lambda}{\Delta x} \cdot v \quad (\text{Eq. 4.2})$$

El hacer el análisis electromagnético en milímetros el flujo y diferencial de flujo están en función de la posición para esta unidad. Como la velocidad nominal es de 1 m/s se pasa el diferencial de flujo a metros.

Ahora se puede aplicar la ecuación 4.2 para obtener la f.e.m.



**Figura 4.19.-** Análisis en vacío, fuerza electromotriz en función de la posición. [Fuente propia]

Como se observa en la imagen, el valor máximo de la fuerza electromotriz en vacío es de 60 V.

Las formas de onda tanto del flujo como de la fuerza electromotriz son casi perfectamente sinusoidales. Aun así, se hará un estudio hasta el séptimo armónico.

#### 4.3.1.1. Análisis de los armónicos

Las fuerzas magneto motriz, f.m.m. combinadas de inductor e inducido, *armature* y *field*, dan lugar a la inducción en el entrehierro que, a su vez es el origen de las f.e.m. inducidas en la máquina. Si existen armónicos, en la onda de la f.m.m. estarán presente en la f.e.m. inducida. Si se desea conseguir un tipo de onda de forma sinusoidal, uno de los requisitos indispensables es la eliminación de éstos. Por desgracia, la total anulación de los armónicos es imposible.

Utilizando los datos obtenidos para el análisis en vacío (anexo 2), se procede a calcular el primer, tercer, quinto y séptimo armónico. Los armónicos se pueden calcular a partir de las series de Fourier. A continuación, se muestra la expresión utilizada:

$$f(x) = A_0 + \sum A_k \sin\left(k \frac{x}{24}\right) + \sum B_k \cos\left(k \frac{x}{24}\right) \quad (\text{Eq. 4.3})$$

donde:

x es la posición.

k es el número del armónico.



$A_0$  Es el promedio del flujo A.

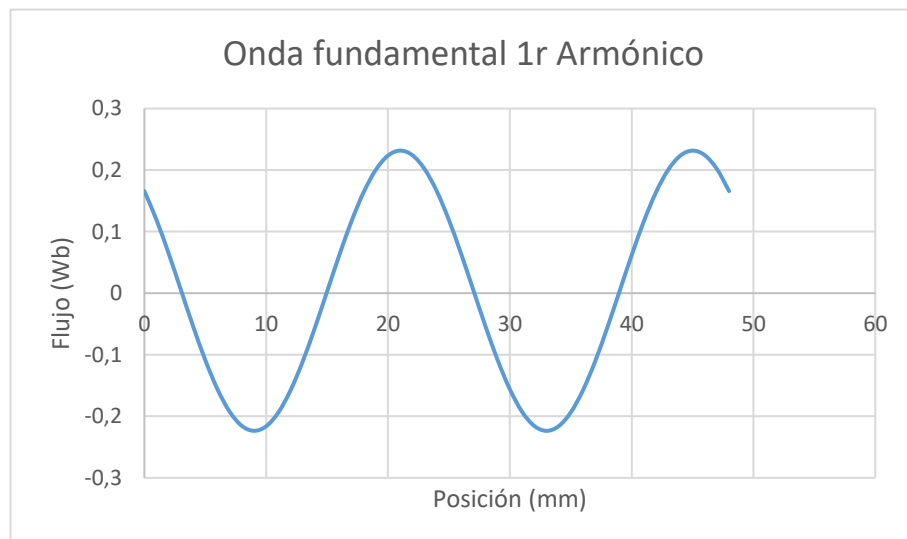
$$A_k = \lambda_k \sin \left( k \frac{x}{24} \right) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

donde:

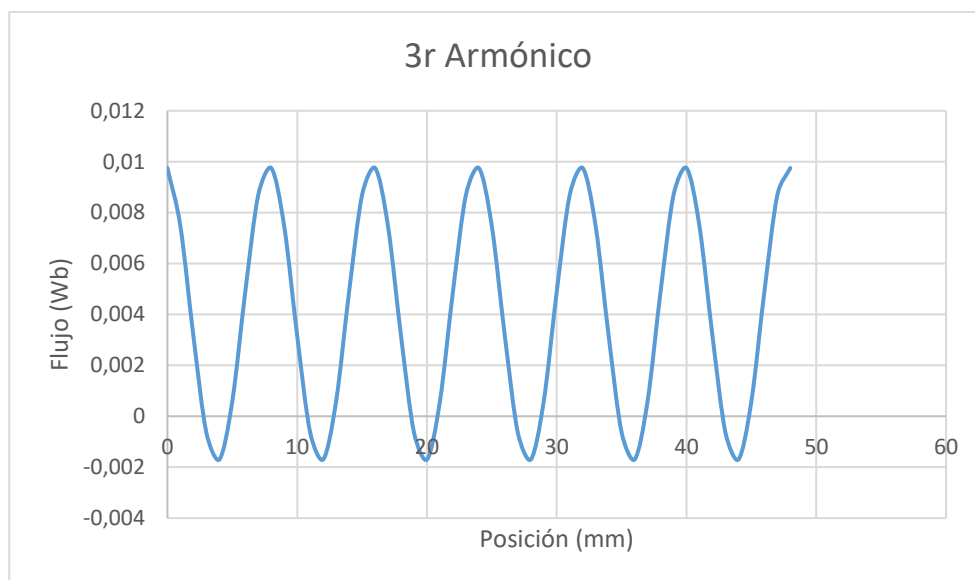
$\lambda$  es el flujo magnético.

$$B_k = \lambda_k \cos \left( k \frac{x}{24} \right) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

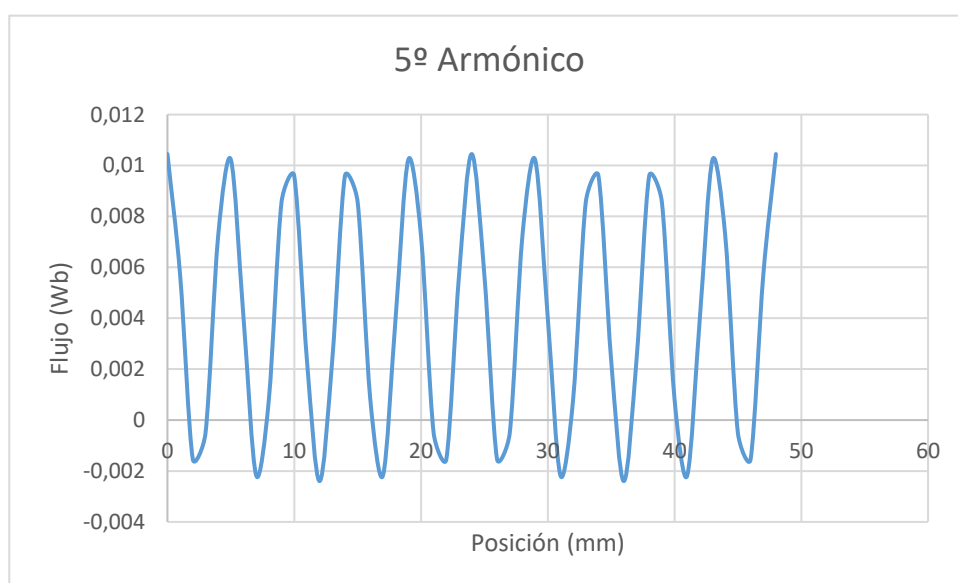
Se divide entre 24 porque el *pole pitch* es de 12 y por lo tanto 24 mm es el periodo entero.



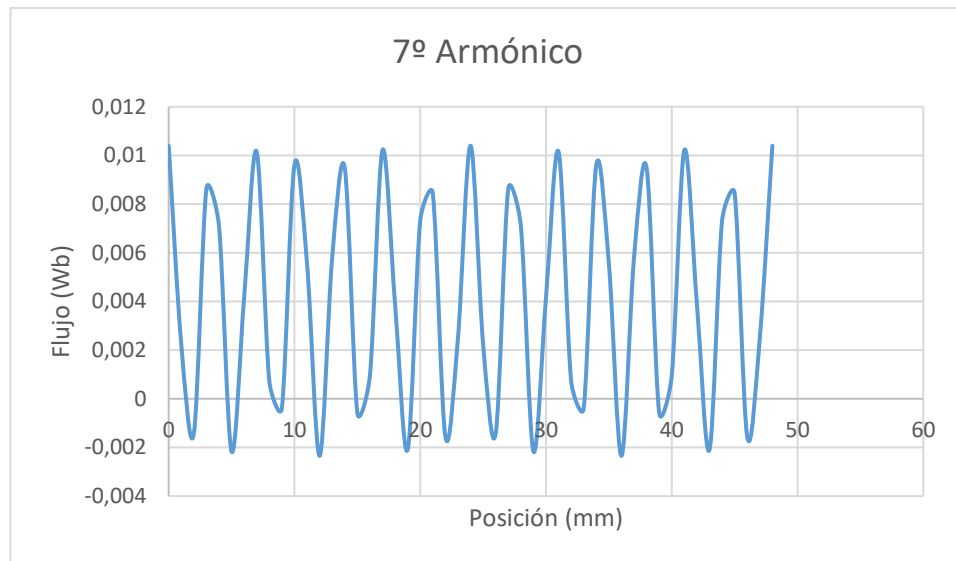
**Figura 4.20.-** Análisis en vacío, onda fundamental, primer armónico. [Fuente propia]



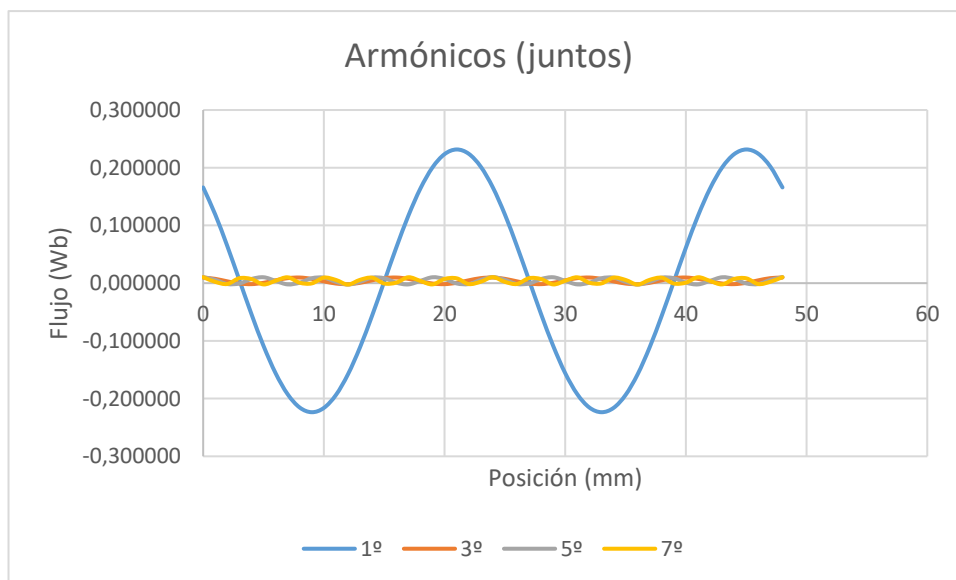
**Figura 4.21.-** Análisis en vacío, tercer armónico. [Fuente propia]



**Figura 4.22.-** Análisis en vacío, quinto armónico. [Fuente propia]



**Figura 4.23.-** Análisis en vacío, séptimo armónico. [Fuente propia]



**Figura 4.24.-** Análisis en vacío, primer, tercer, quinto y séptimo armónico. [Fuente propia]

En la figura anterior se muestran todos los armónicos. Teóricamente, la amplitud del tercer armónico ha de ser  $1/3$  de la amplitud de la onda fundamental, la del quinto  $1/5$  y la del séptimo  $1/7$ . Esto no se cumple. Puede ser debido a algún fallo en el cálculo. Como no afecta al diseño del motor, se prosigue con el análisis en carga.

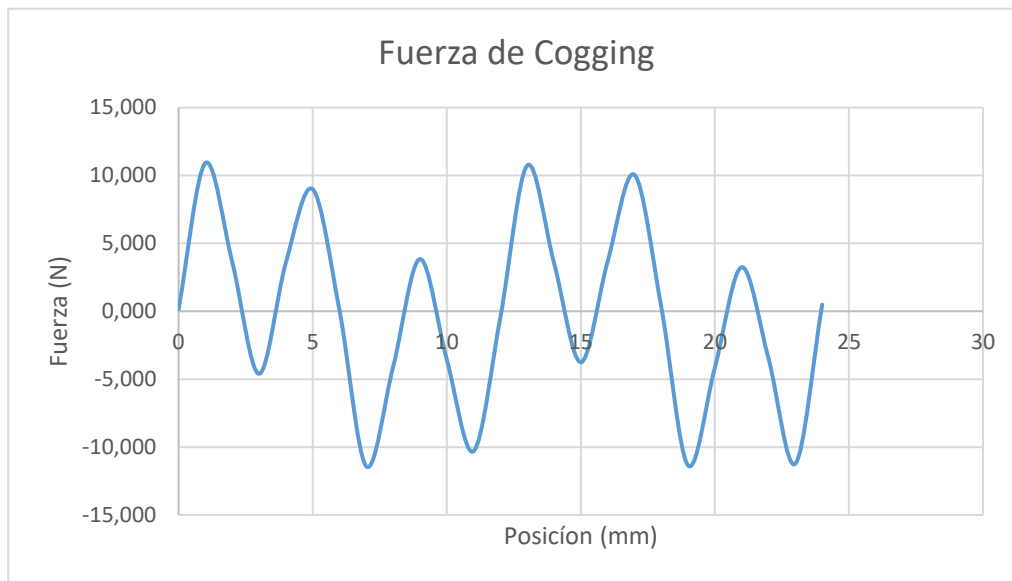
#### 4.3.2. Análisis de la Fuerza de cogging

Como se ha descrito en apartados anteriores, existe una fuerza, o par para motores rotativos, que se genera al interactuar el campo de los imanes con las ranuras de la parte móvil o *armature*. Por lo tanto,

esta fuerza es un tipo de fuerza de pérdidas y es interesante hacer un estudio de ésta y reducirla lo máximo posible.

Se hace pues un programa automatizado, semejante al utilizado para las simulaciones en vacío, calculando la fuerza en vacío. El código del programa se añade en el anexo 1.

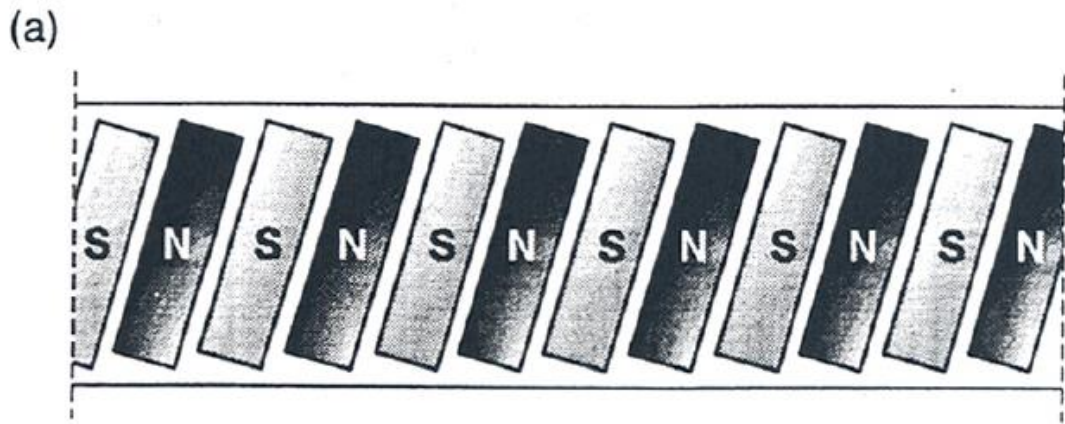
A continuación, se muestra la gráfica obtenida:



**Figura 4.25.-** Análisis en vacío, determinación de la fuerza de cogging. [Fuente propia]

Como se observa en la figura 4.25, la fuerza de cogging tiene una amplitud máxima de 11,3 N. Esto es aproximadamente el 5 % de la fuerza máxima del motor. Aun así, la fuerza de cogging suele tener una forma de onda diferente y, por lo tanto, se intentará optimizar aún más la máquina para reducir la amplitud de esta fuerza.

Una de las maneras de reducir el cogging es añadiendo inclinación a los imanes. Pero más adelante se utiliza otro método que también da resultados.

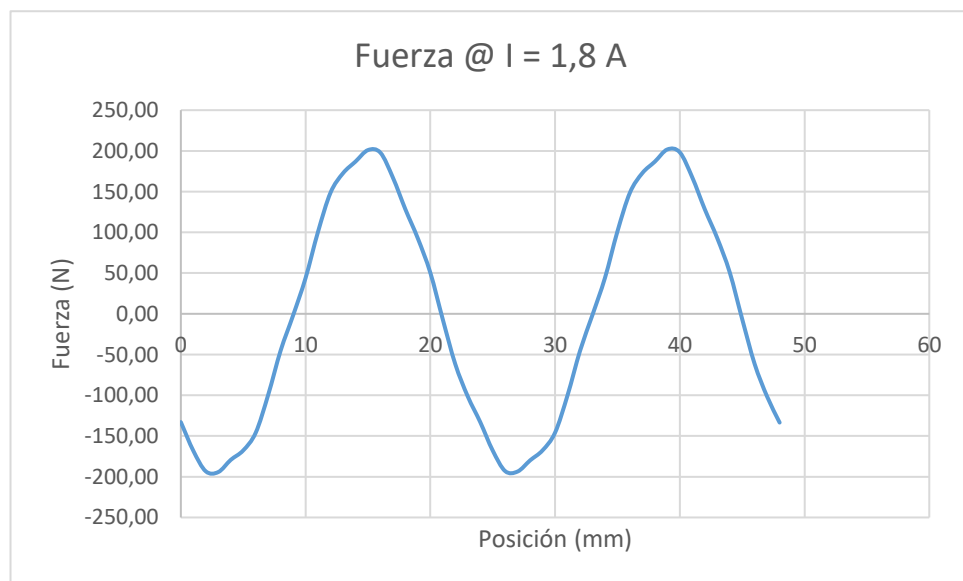


**Figura 4.26.-** Método de reducción de cogging, inclinación de los imanes. [2]

#### 4.3.3. Análisis en carga, fuerza en función de la posición

Ahora se hace el mismo análisis que para la fuerza de cogging pero esta vez alimentando el motor a la carga requerida para dar la fuerza necesaria. Primero se alimenta el motor para obtener la fuerza máxima y luego se hace lo mismo para obtener la fuerza nominal. El código utilizado para las simulaciones de este apartado se adjunta en el anexo 1.

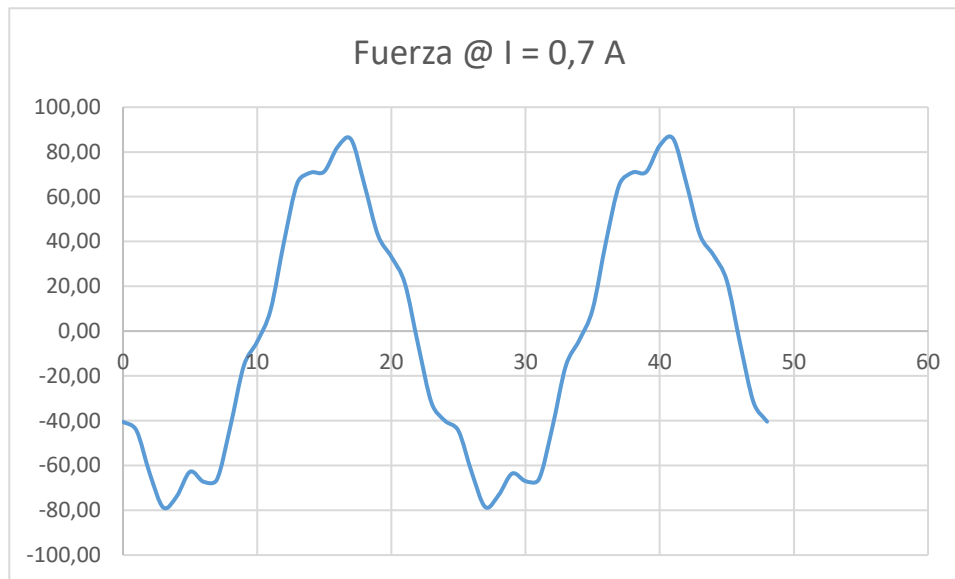
Como se ha mencionado en apartados anteriores, primero se requiere encontrar el punto óptimo donde el motor da la fuerza máxima, en otras palabras, que el campo creado por los imanes y el campo creado por la corriente de la parte móvil estén desfasados  $90^\circ$ . En una primera iteración, este punto era la posición 20, pero al cambiar la geometría del motor, este punto pasa a ser la posición 15.



**Figura 4.27.-** Análisis en carga, fuerza en función de la posición. [Fuente propia]

Como se observa en la figura 4.27, para la posición 15 la fuerza es máxima, 200 N. La forma de onda no es del todo sinusoidal debido seguramente a los armónicos y a la fuerza de cogging calculada en el epígrafe anterior.

A continuación, se hace la misma simulación para obtener la fuerza nominal, es decir, alimentando el motor a 0,7 A.



**Figura 4.28.-** Análisis en carga, fuerza en función de la posición. [Fuente propia]

Como se observa en la figura 4.28, la forma de onda es peor que la mostrada para la fuerza máxima. Esto es debido a los armónicos y a la alta fuerza de cogging.

#### 4.3.4. Análisis en carga, fuerza en función del tiempo

Una vez obtenido el punto que da la fuerza máxima y la corriente necesaria para entregar la fuerza requerida, se hace un análisis en carga empezando por dicho punto y variando la corriente en función de la posición hasta llegar a  $2\tau_p$  (dos veces el *pole pitch*). Para el motor en estudio, el *pole pitch* es de 12 milímetros. Por lo tanto, se mueve 24 milímetros.

Para máquinas rotativas, las corrientes alternas son funciones trigonométricas que dependen de una amplitud, de un ángulo o posición y tienen un desfase. El ángulo ha de ser multiplicado por los pares de polos.

$$I_A = \hat{I} \cos(p\theta) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$I_B = \hat{I} \cos \left( p\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$I_C = \hat{I} \cos \left( p\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$

En el caso de la máquina lineal, la posición no es un ángulo, depende de la posición lineal.

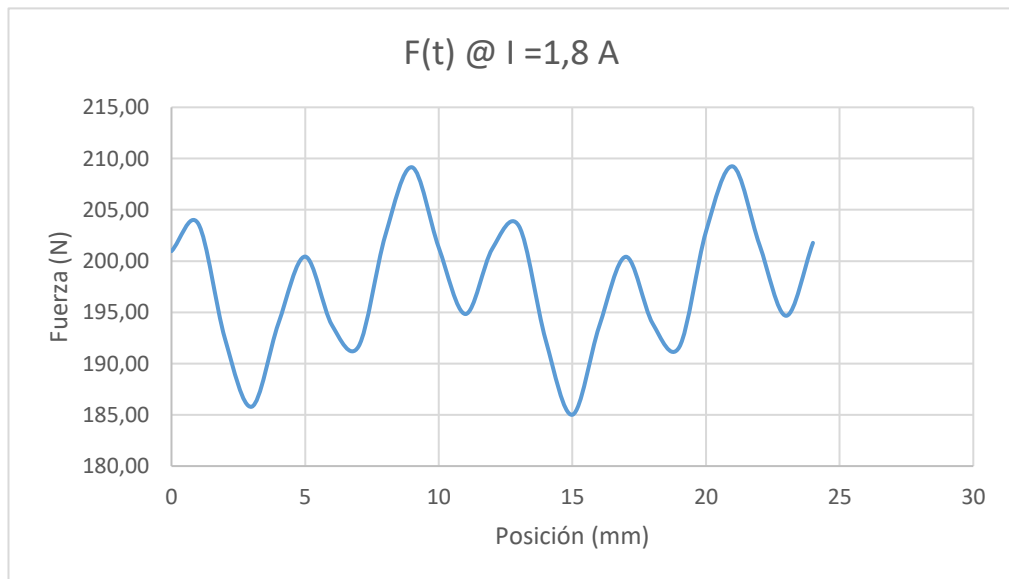
Al ser 12 mm el *pole pitch* del motor, las corrientes del motor se pueden modificar en función de la posición a partir de las siguientes ecuaciones.

$$I_A = \hat{I} \cos \left( 2\pi \frac{x}{24} \right) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$I_B = \hat{I} \cos \left( 2\pi \frac{x}{24} - \frac{2\pi}{3} \right)$$

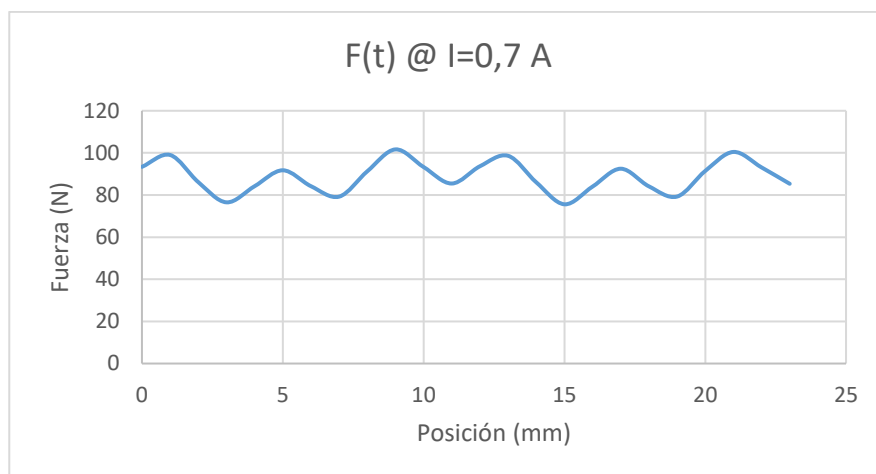
$$I_C = \hat{I} \cos \left( 2\pi \frac{x}{24} + \frac{2\pi}{3} \right)$$

Se decide hacer un diferencial de x de 1 mm se obtienen los resultados siguientes:



**Figura 4.29.-** Análisis en carga, fuerza en función del tiempo, variando la corriente en función de la posición.  
[Fuente propia]

El valor promedio de la fuerza es de 197,68 N.



**Figura 4.30.-** Análisis en carga, fuerza en función del tiempo, variando la corriente en función de la posición.  
[Fuente propia]

El valor medio es de 88 N.

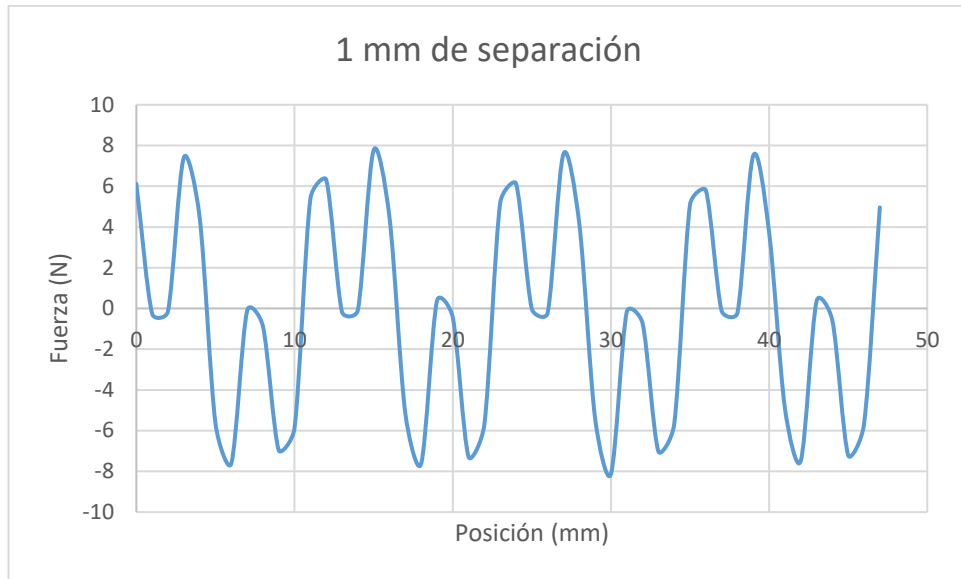
#### 4.4. Optimización de la fuerza de cogging

Como se ha mostrado en el epígrafe 4.4, para la geometría estudiada se genera una fuerza de cogging que perturba la forma de onda, sobretodo la forma de onda para la fuerza nominal. Una solución que se ha encontrado para este problema es añadir separación entre los imanes.

Se ha hecho el siguiente estudio:

Añadiendo 1 milímetro de separación entre los imanes se obtiene la siguiente forma de onda para la fuerza de cogging.





**Figura 4.31.-** Optimización de la fuerza de cogging, 1 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]

Se observa como al añadir espacio entre los imanes se disminuye la fuerza de cogging. También se observa que la forma de onda también ha cambiado.



**Figura 4.32.-** Optimización de la fuerza de cogging, 2 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]

Añadiendo 2 mm entre imanes se consigue reducir aún más la fuerza de cogging. Veamos que pasa al seguir aumentando.



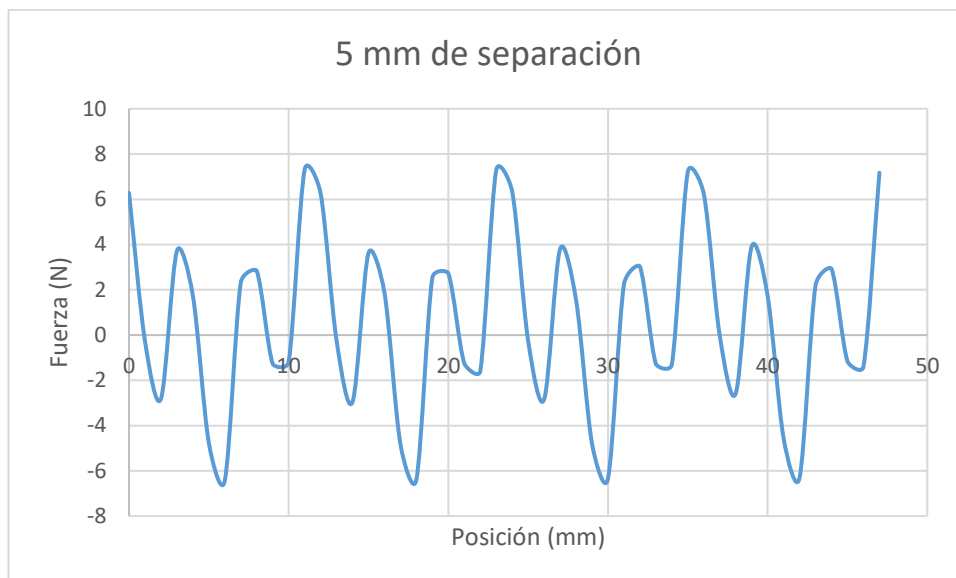
**Figura 4.33.-** Optimización de la fuerza de cogging, 3 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]

Para esta separación, la forma de onda adquiere una forma más típica de la fuerza de cogging, además de consigue reducir en más del 50 % la fuerza de cogging inicial, figura 4.25, para el motor sin separación.



**Figura 4.34.-** Optimización de la fuerza de cogging, 4 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]

Para esta separación, se puede observar como la amplitud vuelve a aumentar y la forma de onda vuelve a ser más caótica.



**Figura 4.35.-** Optimización de la fuerza de cogging, 5 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]

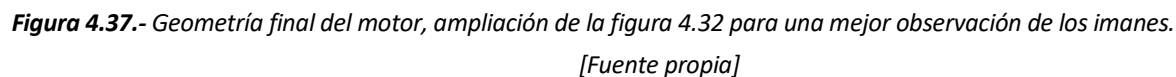
Para ésta separación, la amplitud no aumenta, pero sí que cambia la forma de onda.

A continuación, se muestra la siguiente tabla resumiendo los resultados obtenidos en términos de amplitud y separación.

*Tabla 4.8- Fuerza de cogging para diferentes separaciones entre imanes.*

Separación (mm)	Amplitud (N)
1	7,7
2	5,4
3	4,83
4	7,5
5	7,3

Se observa tanto en la figura 4.33 como en la tabla 4.8 que la separación óptima es la de 3 milímetros. Por lo tanto, la geometría final serán las mismas dimensiones mencionadas en el apartado 4.2 pero añadiendo 3 mm de separación entre imanes.



*Tabla 4.9.- Dimensionamiento final del motor.*

 **UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**  
**BARCELONATECH**  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

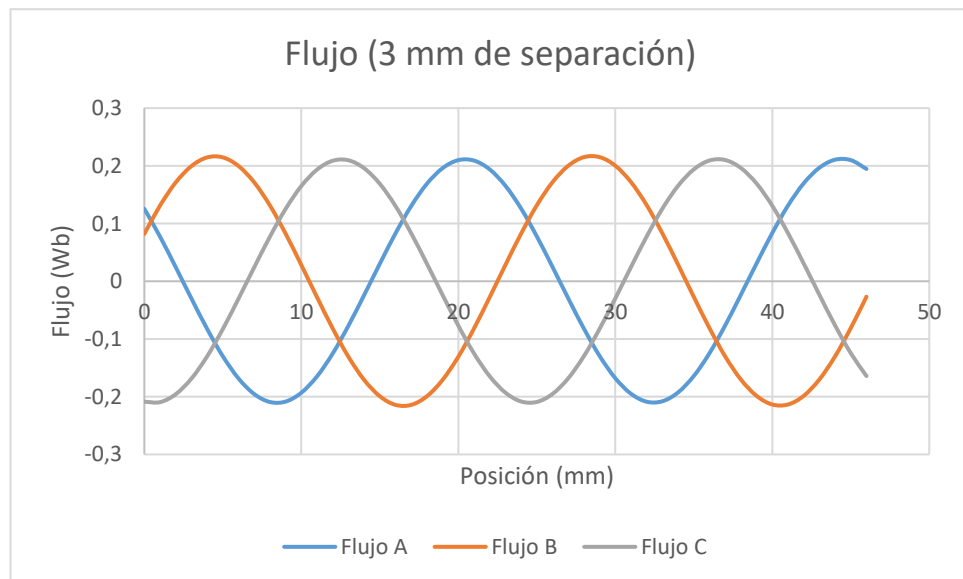
Longitud de los imanes (mm)	9
Altura de los imanes (mm)	3
Separación entre imanes (mm)	3

#### 4.5. Comparación del análisis electromagnético del motor con imanes juntos y con 3 milímetros de separación

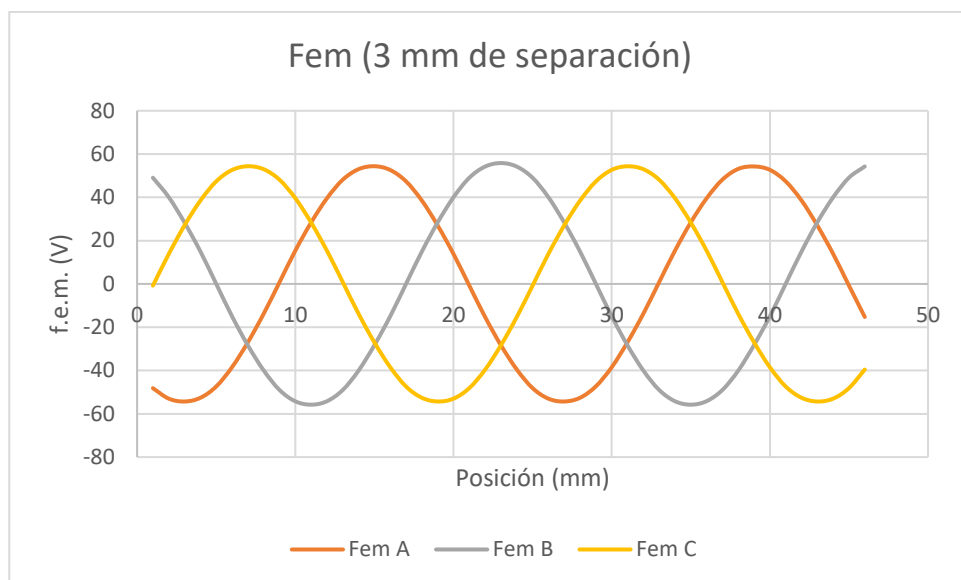
En este apartado, se realizarán las mismas simulaciones que las realizadas en el apartado anterior y se compararán las gráficas entre la configuración con imanes juntos y la configuración con tres milímetros de separación.

##### 4.5.1. Análisis en vacío

A continuación, se mostrarán las gráficas para los flujos A, B, C las f.e.m. para las 3 fases. Se obviarán las tablas mostradas en el apartado anterior.



**Figura 4.38.-** Análisis en vacío, flujo A, B y C en función de la posición, 3 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]

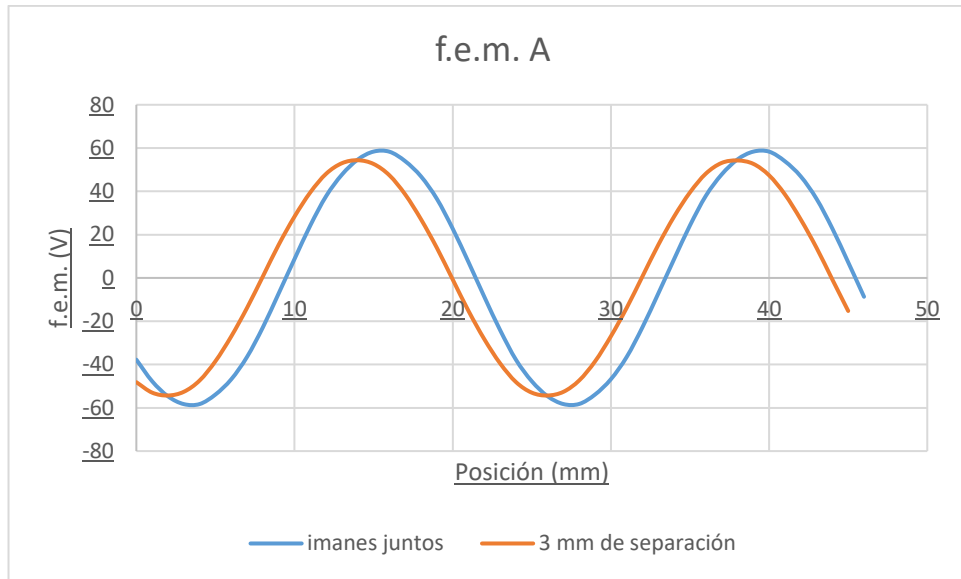


**Figura 4.39.-** Análisis en vacío, fuerza electromotriz en función de la posición, 3 mm de separación entre imanes.  
[Fuente propia]

Ahora se mostrarán dos graficas comparando el flujo A y la fuerza electromotriz A para los imanes juntos y con 3 milímetros de separación.

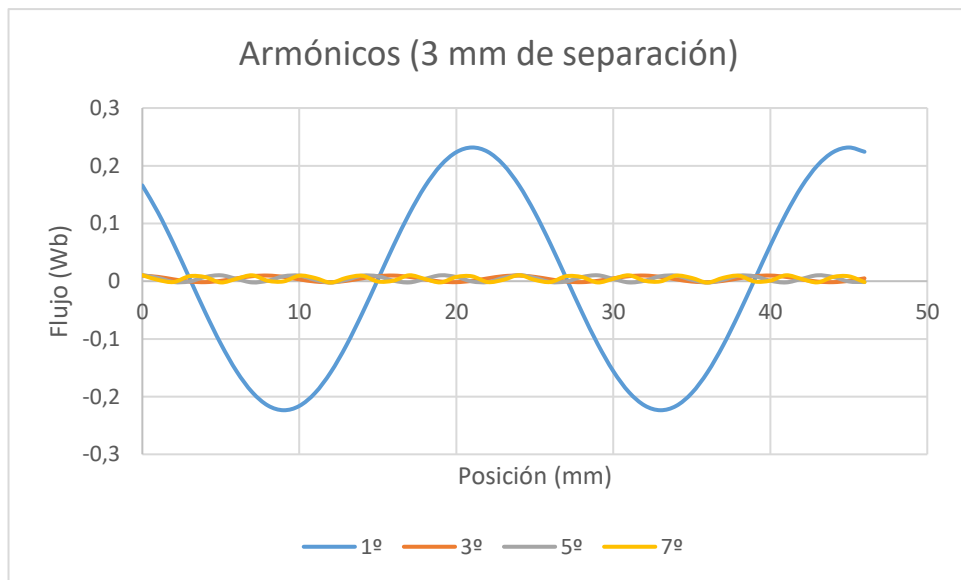


**Figura 4.40.-** Comparación entre el flujo obtenido para configuración entre imanes juntos y para la configuración con 3 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]



**Figura 4.41.-** Comparación entre el flujo obtenido para configuración entre imanes juntos y para la configuración con 3 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]

Como se observa en las figuras 4.40 y 4.41, no hay diferencias significativas. Se puede concluir que, al añadir separación entre los imanes, la f.e.m. decrece ligeramente y también sufre un pequeño desfase. Por lo tanto, la posición de fuerza máxima seguramente también habrá cambiado.

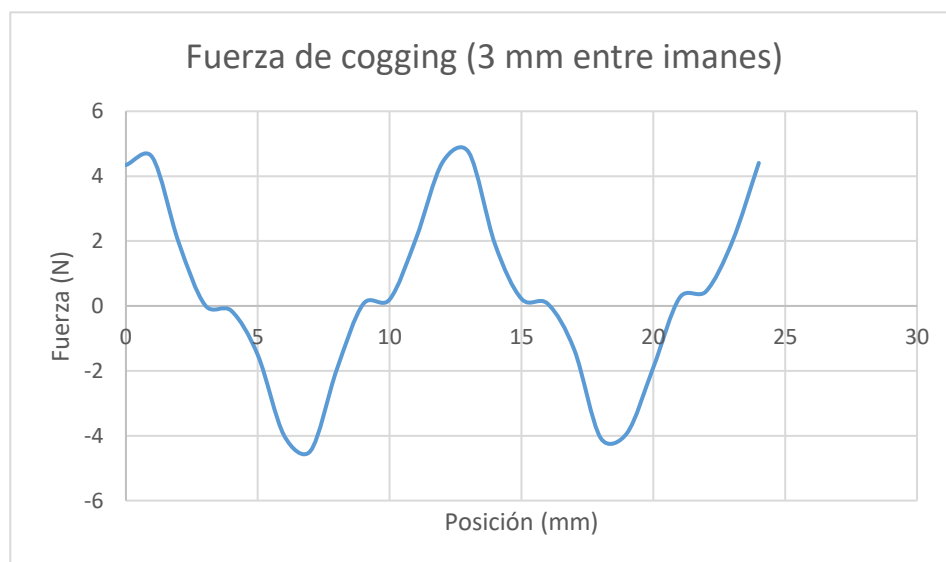


**Figura 4.42.-** Análisis en vacío, primer, tercer, quinto y séptimo armónico, para la configuración con 3 mm de separación. [Fuente propia]

Para el cálculo de los armónicos apenas se notan diferencias.

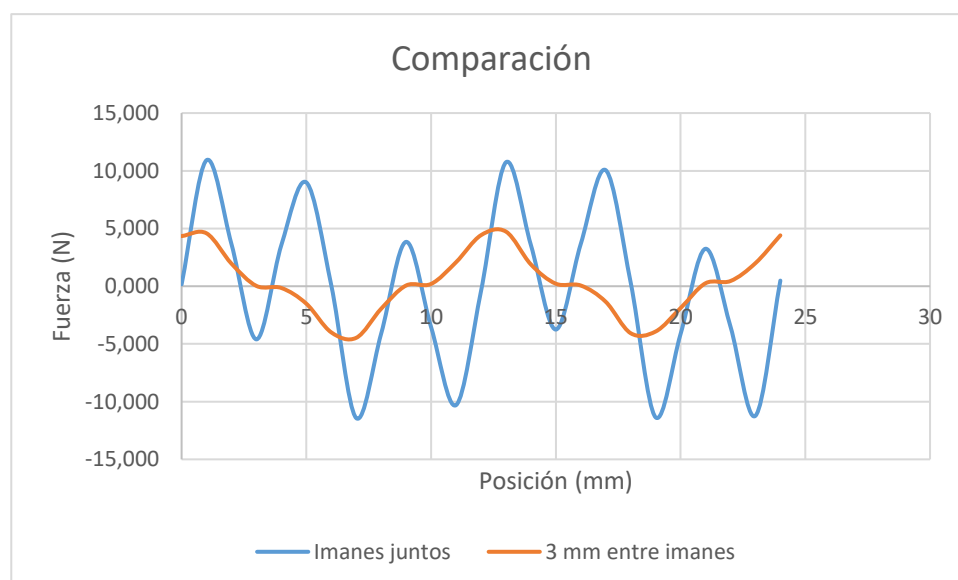
#### 4.5.2. Análisis en la fuerza de cogging

Añadiendo 3 milímetros de separación entre los imanes, se consigue optimizar aún más el motor como se demostró en el apartado 4.7. La fuerza de cogging para esta configuración se obtiene el siguiente resultado:



**Figura 4.43.-** Análisis en vacío, fuerza de cogging, 3 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]

Ahora se muestra la comparación entre imanes juntos y con espaciado:



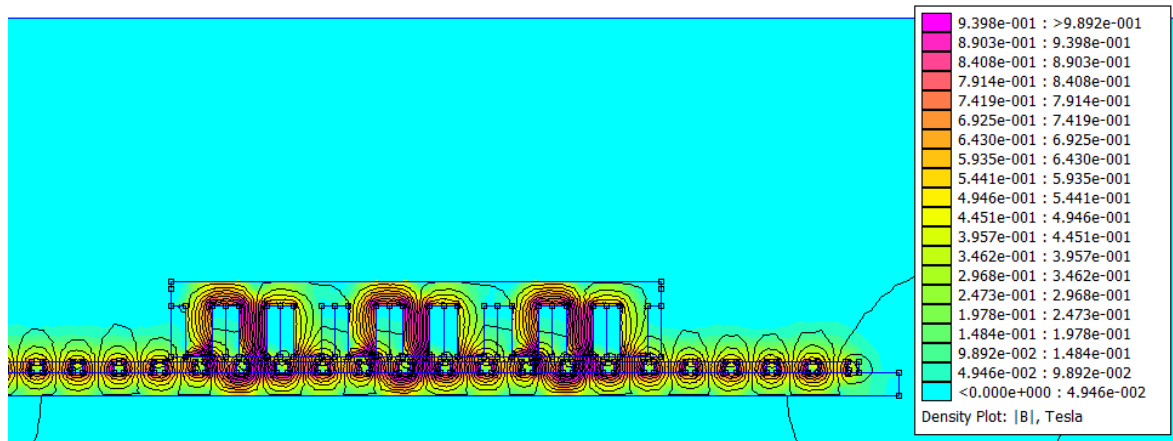
**Figura 4.44.-** Comparación entre la fuerza de cogging obtenido para configuración entre imanes juntos y para la configuración con 3 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]



En la figura 4.44, se observa cómo se reduce la fuerza de cogging prácticamente a la mitad, motivo por el cual se ha añadido esta separación entre los imanes.

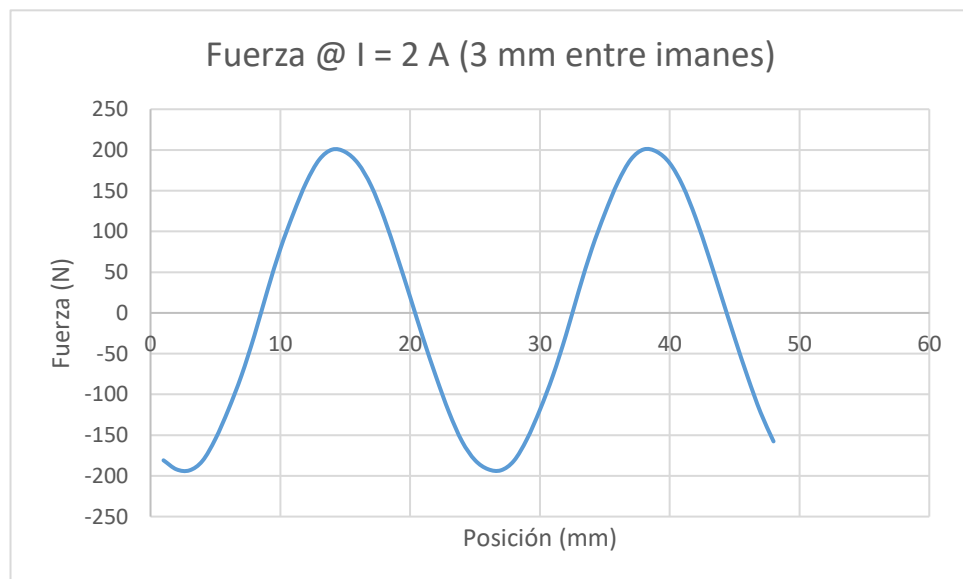
#### 4.5.3. Análisis en carga en función de la posición

Para esta nueva geometría, la posición de fuerza máxima cambia a  $x = 14$ . También se necesita alimentar la máquina a 2 A para obtener los 200 N de fuerza. A continuación, se muestra el mapa de inducción de la máquina.

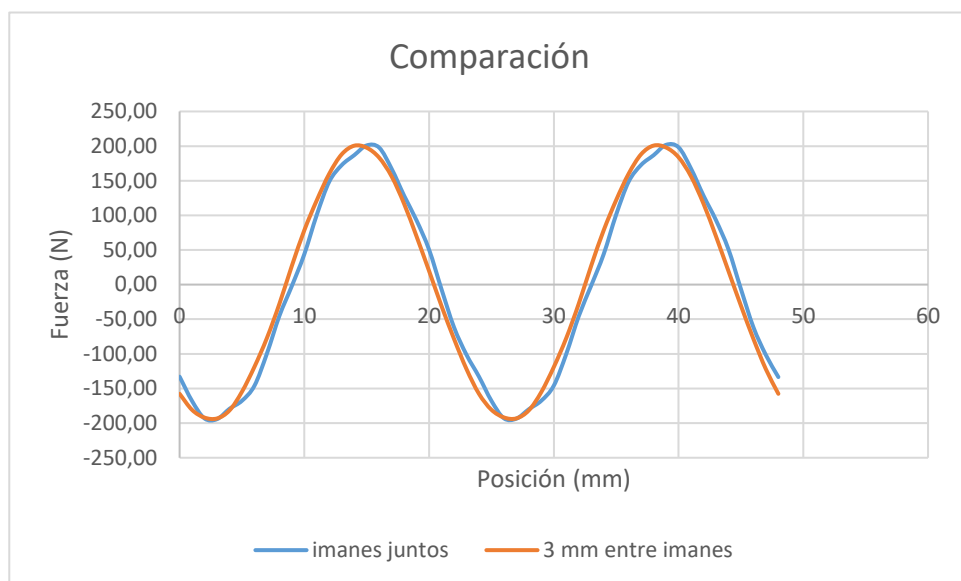


**Figura 4.45.-** Comportamiento electromagnético para la geometría definitiva, @  $I = 2$  A, inducción máxima 0,98 T. [Fuente propia]

Se observa que la inducción no llega ni a 1 T alimentando el motor con la corriente para la máxima carga.



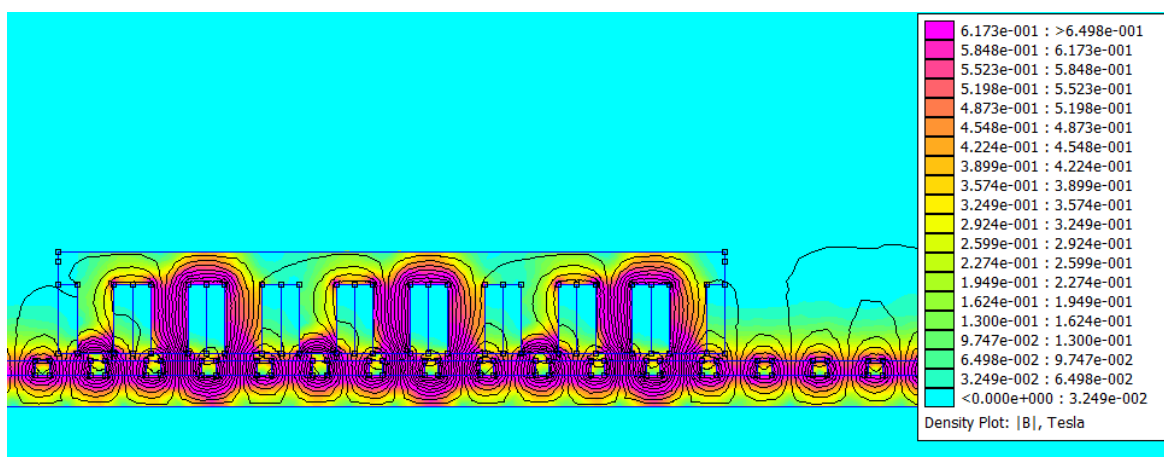
**Figura 4.46.-** Análisis en carga, fuerza en función de la posición, para la geometría definitiva, @  $I = 2\text{ A}$  [Fuente propia]



**Figura 4.47.-** Comparación entre la fuerza de cogging obtenido para configuración entre imanes juntos y para la configuración con 3 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]

Al mejorar la fuerza de pérdida de cogging se mejora también la forma sinusoidal de la onda. Otro cambio es que se ha tenido que aumentar 0,2 A para obtener los 200 N.

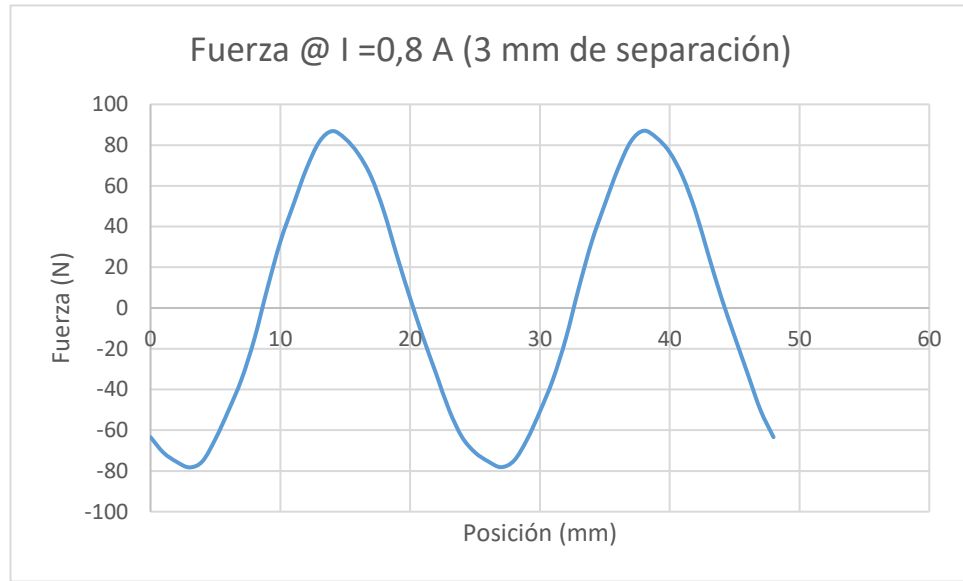
Para obtener el valor de fuerza nominal se requiere alimentar el motor a 0,8 A.



**Figura 4.48.-** Comportamiento electromagnético para la geometría definitiva, @  $I = 0,8\text{ A}$ , inducción máxima 0,65 T. [Fuente propia]

La saturación está por debajo de 0,7 T. Por lo tanto, se ha obrado correctamente añadiendo la separación entre imanes.

A continuación, se mostrará como varía la fuerza a medida que se va cambiando la posición.

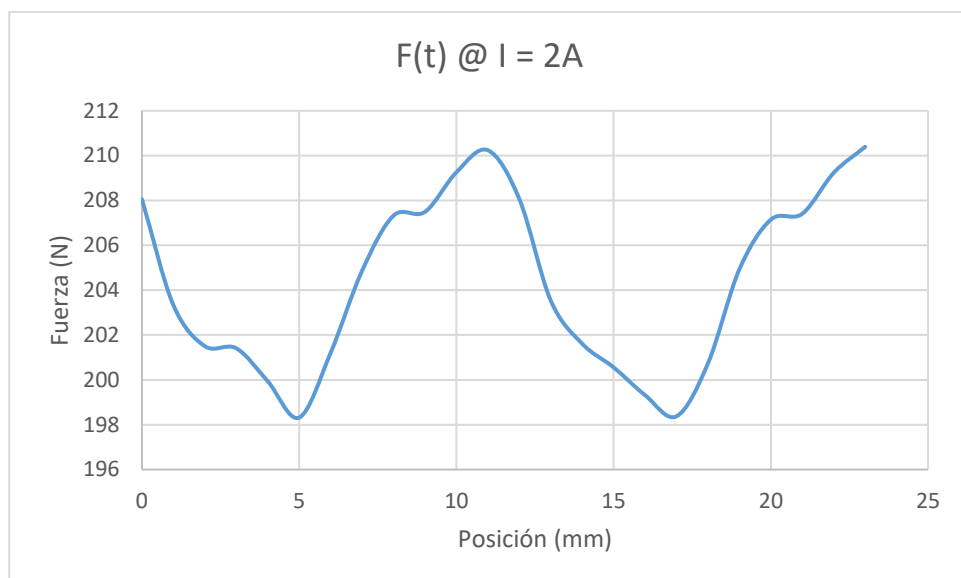


**Figura 4.49.-** Análisis en carga, fuerza en función de la posición, para la geometría definitiva, @  $I = 0,8$  A [Fuente propia]

Como se ve en la figura anterior, la posición de fuerza máxima sigue siendo 14. Se obtiene un poco más de 80 N alimentando el motor a 0,8 A.

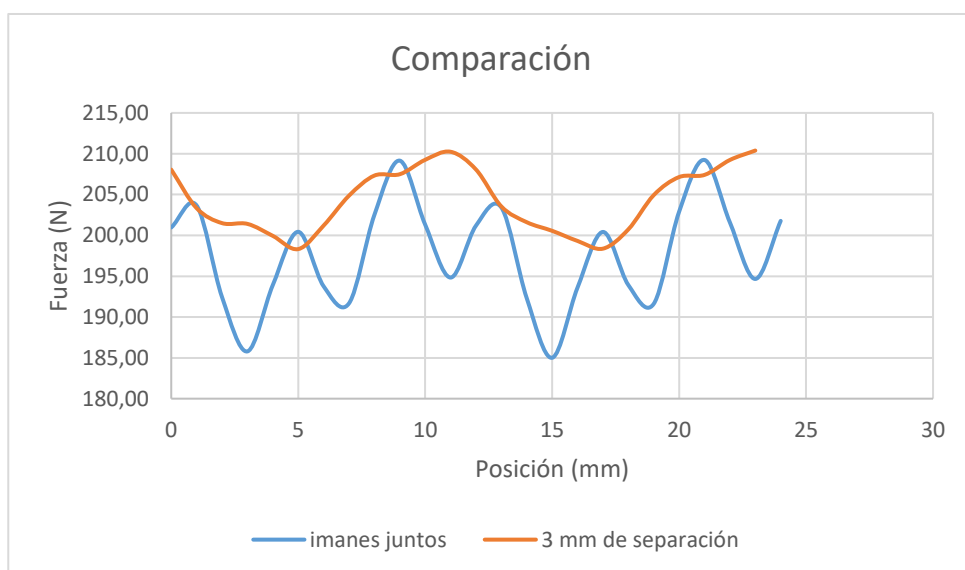
#### 4.5.4. Análisis en carga en función del tiempo

A partir de la posición donde el motor entrega la máxima fuerza,  $x = 14$ , se mueve la *armature* con un diferencial de  $x$  de 1 milímetro hasta dos veces el *pole pitch*. Se muestra la gráfica obtenida para el motor con 3 milímetros de separación.



**Figura 4.50.-** Análisis en carga, fuerza en función del tiempo, para la geometría definitiva, @  $I = 2\text{ A}$  [Fuente propia]

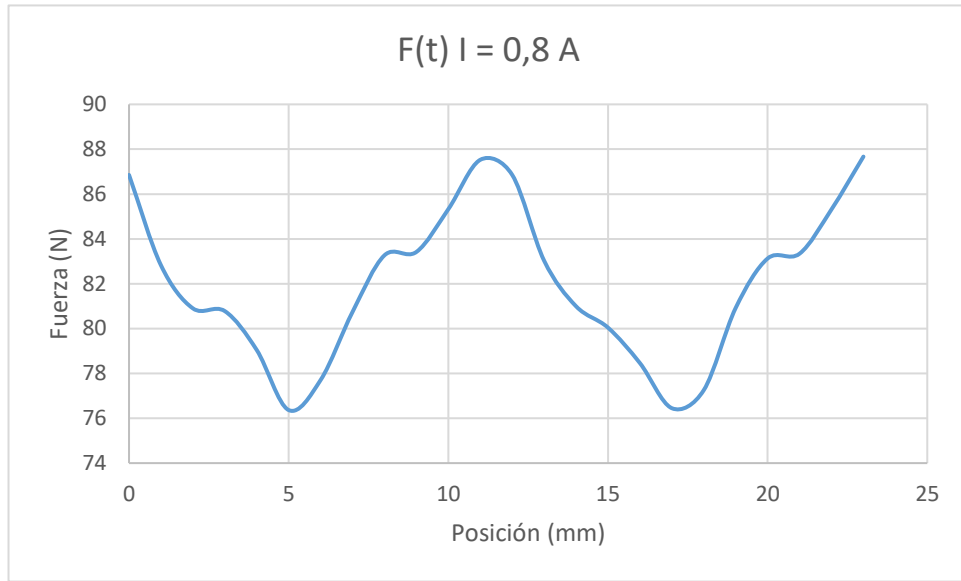
Y ahora como en los apartados anteriores se muestra la comparación de las dos geometrías estudiadas.



**Figura 4.51.-** Comparación entre la fuerza en función del tiempo obtenida para configuración entre imanes juntos y para la configuración con 3 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]

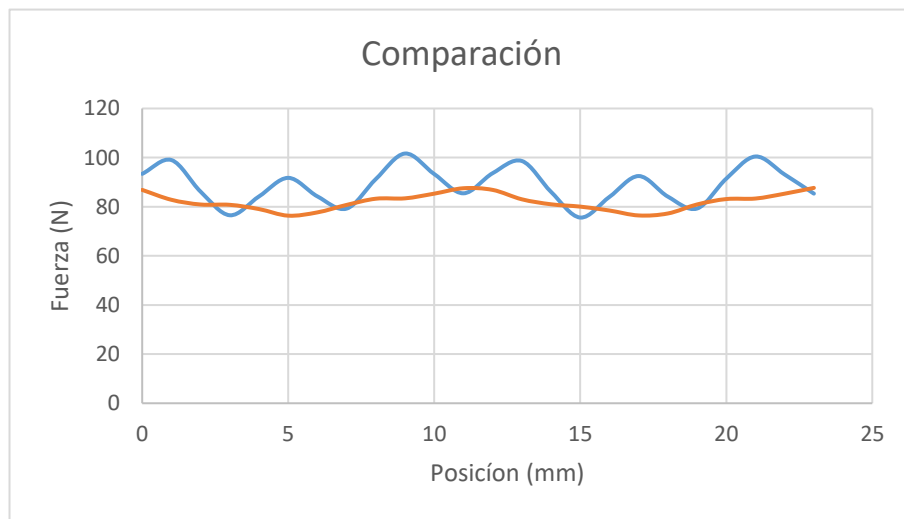
Como se observa en la figura 4.51, la forma de onda obtenida para la distribución con 3 mm de separación tiene una forma más sinusoidal, aun así, no lo es del todo. También se observa como aumenta la amplitud del motor, teniendo que el valor medio de fuerza para la distribución con imanes juntos es de 197 N y para la distribución con 3 mm de separación es de 204 N.

Alimentante el motor a 0,8 A para obtener la fuerza nominal se obtiene la siguiente grafica



**Figura 4.52.-** Análisis en carga, fuerza en función del tiempo, para la geometría definitiva, @  $I = 0,8 \text{ A}$  [Fuente propia]

Y comparando con la configuración con imanes juntos:



**Figura 4.53.-** Comparación entre la fuerza en función del tiempo obtenida para configuración entre imanes juntos y para la configuración con 3 mm de separación entre imanes. [Fuente propia]

## 4.6. Conclusiones

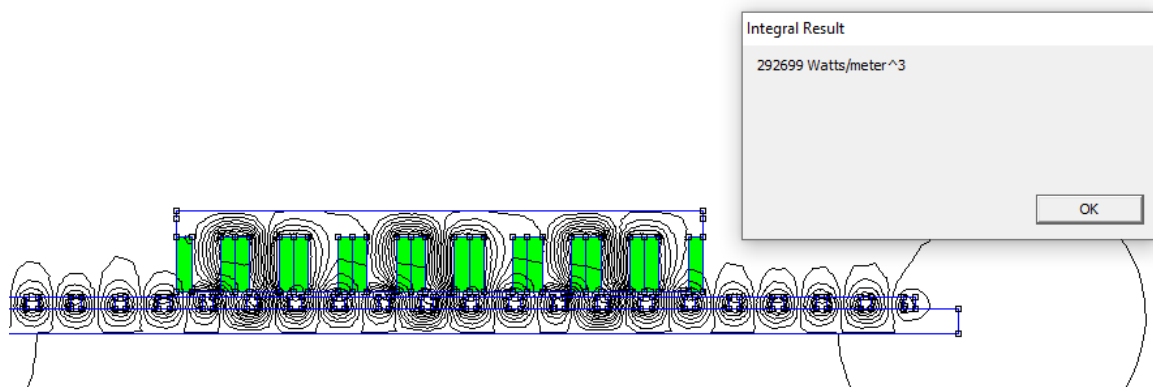
Una vez hecho los dos análisis para las dos configuraciones elegidas y habiendo comparado el comportamiento de ambas distribuciones, se llega a la conclusión que la distribución con tres milímetros de separación entre imanes es la más óptima. Debido a que se reduce en aproximadamente un 50 % el par de cogging, se obtiene una forma de onda en carga más sinusoidal y se reduce la inducción magnética de 0,9 T para la máquina con imanes juntos a 0,7 T.

También cabe decir que para desplazar el motor 100 milímetros son necesarios 20 imanes. Por lo tanto, si se quiere desplazar recorridos como por ejemplo 1000 milímetros o 1 metro serán necesarios 200 imanes.

## 5. Análisis Térmico

El programa de elementos finitos FEMM también permite realizar simulaciones térmicas. En el análisis térmico sólo se hace el estudio de la parte móvil o *armature*.

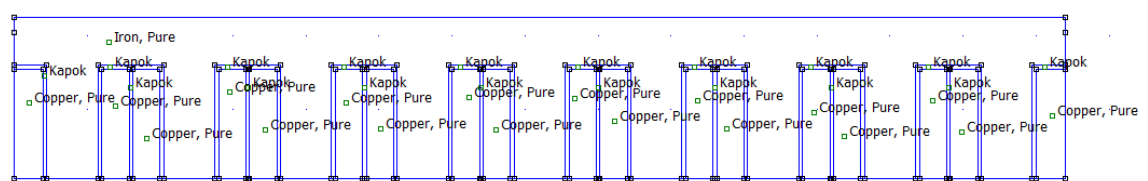
Primero, en el análisis magnético, se calculan las pérdidas en el cobre. Luego, se divide entre el volumen para obtener la densidad de pérdidas. Si se tiene la última versión de FEMM se pueden calcular directamente las *total loss density* que tiene como unidad  $W/m^3$ .



**Figura 5.1.-** Análisis magnético, cálculo de las pérdidas en el cobre. [Fuente propia]

Una vez obtenidas esta densidad de pérdidas, se va al análisis térmico y se pone como característica de volumen de generación de calor.

Después se añade un material aislante entre el cobre y el hierro. Este material tiene un espesor de 0,5 milímetros y se utiliza el material Kapok, material parecido al Nomex.



**Figura 5.2.-** Análisis térmico, configuración de la parte móvil para la simulación. [Fuente propia]

A continuación, se define las condiciones de contorno. Existen varios tipos de modos de transferencia de calor, pero el que utilizaremos nosotros es transferencia de calor por convección.

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el

movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido mayor es la transferencia de calor por convección.

Existen dos tipos de convección, la convección natural y la convección forzada. Si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que se generan a partir de las diferencias de densidad debidas a la variación de temperatura se dice que es convección natural. Si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador o bomba se conoce como convección forzada. Aquí solo se estudiará la convección natural.

Una vez hecho la introducción teórica se procede a definir las condiciones de contorno. Para ello, se pide un coeficiente de convección. Este coeficiente se puede estimar de la siguiente manera:

$$N_u = C(Gr \cdot Pr)^n \quad (\text{Eq. 5.1})$$

donde:

C es un coeficiente que depende del medio de intercambio (aceite, aire, ...).

Gr es el número de Grashof.

Pr es el número de Prandtl.

Nu es el número de Nusselt.

Se puede utilizar una expresión más simple en el caso de bobinas i transformadores (placas horizontales, verticales i inclinadas) obviando los cálculos de los coeficientes mencionados anteriormente y llegando a la siguiente ecuación:

$$h = C \left( \frac{p}{p_{ref}} \right)^{\alpha_p} \left( \frac{T_a}{T_{a,ref}} \right)^{\alpha_{Ta}} \frac{(\Delta T)^{\alpha_T}}{L^{\alpha_L}} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

donde:

C es una constante y tiene un valor de 1,53 para placas horizontales; 1,58 para placas verticales y 1,35 para montajes cerrados y armarios.

p es la presión real.

p<sub>ref</sub> es la presión de referencia.

T<sub>a</sub> es la temperatura ambiente real.



$T_{a,ref}$  es la temperatura ambiente de referencia.

$\Delta T$  es la elevación de temperatura ( $T - T_a$ ).

$L$  es la distancia total por la que pasa el aire.

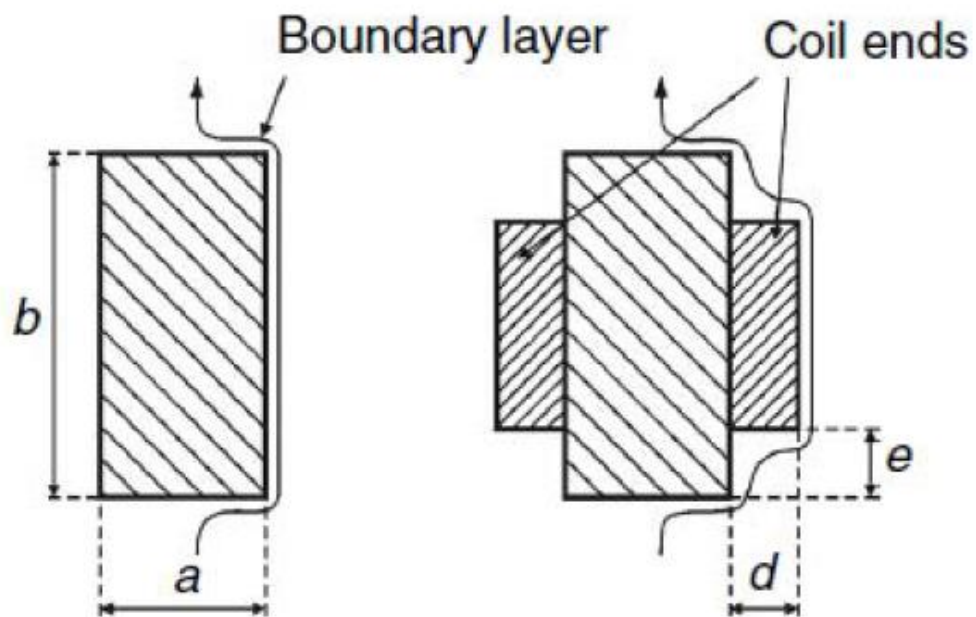
$\alpha_p$  tiene un valor de 0,477.

$\alpha_{Ta} = -0,218$ .

$\alpha_T = 0,225$ .

$\alpha_L = 0,285$ .

La distancia por la cual pasa el aire se puede determinar a partiendo de la siguiente imagen.



**Figura 5.3.-** Análisis Térmico, determinación de la longitud por la cual pasa el fluido. [9]

Para el cálculo de la longitud hace falta considerar que en general la longitud es igual a la mitad de la longitud del camino más corto al largo de la sección vertical del objeto en cuestión. Por ejemplo, para la figura 4.51.

Para la sección de la izquierda:

$$L = a + b \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Para la sección de la derecha:

$$L \approx a + b - 2e + 2\sqrt{d^2 + e^2} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Se procede al cálculo de la longitud para nuestro motor utilizando la ecuación 5.4. Se hacen las siguientes estimaciones: el bobinado sobre sale una distancia de 10,5 milímetros. La distancia entre el bobinado y la parte inferior de la *armature* es cero,  $e = 0$ .

$$L \approx 39 + 22 - 2 \cdot 0 + 2\sqrt{10,5^2 + 0^2} = 60,22 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Una vez obtenida la longitud se procede al cálculo del coeficiente de convección. Para nuestro motor, se han supuesto los siguientes parámetros:

$C = 1,58$  (placa vertical)

$p = 1 \text{ atm}$  (101325 Pa)

$p_{\text{ref}} = 1 \text{ atm}$  (101325 Pa)

$T_a = 293 \text{ K}$  (20 °C)

$T_{a,\text{ref}} = 313 \text{ K}$  (40 °C)

$\Delta T = 323 \text{ K}$  (50 °C)

$\alpha_p$  tiene un valor de 0,477

$\alpha_{Ta} = -0,218$

$\alpha_T = 0,225$

$\alpha_L = 0,285$

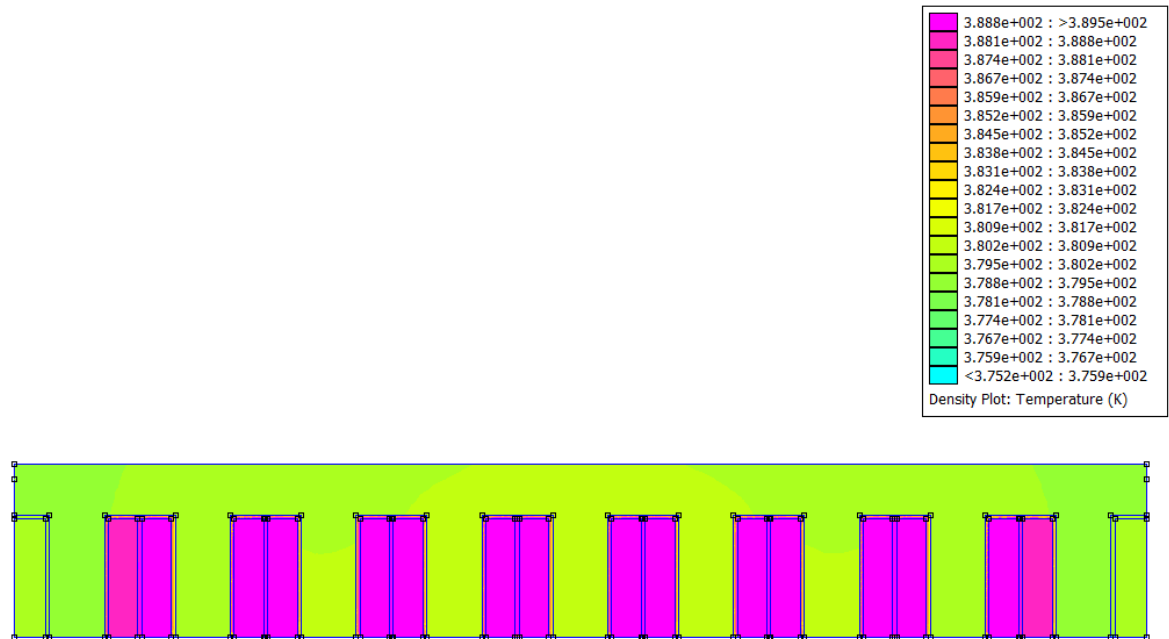
Mediante la ecuación 5.2 se obtiene el coeficiente:

$$h = 1,58 \left( \frac{101325}{101325} \right)^{0,477} \left( \frac{293}{313} \right)^{-0,218} \frac{(323)^{0,225}}{0,06022^{0,285}} = 13,1 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Se sabe que, para convección natural, el coeficiente tiene un valor entre 2 y 25 W/m<sup>2</sup>·K por lo tanto, el valor obtenido en la ecuación 5.2 es correcto.

Calculo el valor de convección se crea las condiciones de contorno y se configura que la temperatura llega a los 40 °C.

Una vez configurado todos los parámetros se procede a la simulación térmica.



**Figura 5.4.-** Análisis Térmico, determinación de la longitud por la cual pasa el fluido. [Fuente propia]

En la figura anterior se observa cómo la parte más crítica en términos de temperatura es el bobinado. Esto es lógico ya que éste se calienta a razón del cuadrado de la corriente que circula. La temperatura en el devanado alcanza los 389,5 K que son 96,5 °C. Esta temperatura está dentro del margen que aguanta el aislamiento de una máquina eléctrica. Sería suficiente entonces con un aislamiento de tipo A (105 °C).

*Tabla 5.1.-Clases de aislamientos y sus diferentes temperaturas de trabajo.*

Clase	Temperatura máxima de trabajo (°C)
A	105
B	130
F	155

H	180
---	-----

En el hierro, la temperatura es menor pero aun así alcanza los 380 K o 87,5 °C.

Por lo tanto, se puede concluir que el motor trabajando a la máxima carga, entregando una fuerza de 200 N, puede trabajar sin ningún problema sin tener ningún tipo de exceso de calentamiento. Otro punto a favor es que el motor no estará continuamente funcionando en régimen permanente, sino que su rango de trabajo será de apenas unos segundos para la apertura o cierre de la compuerta.

## 6. Presupuesto

A continuación, se hace un estudio del presupuesto analizando los costes del diseño del motor como de la fabricación de un prototipo. También se tienen en cuenta el coste del trabajo realizado del ingeniero como de la mano de obra para la fabricación de la máquina.

Para empezar, en la siguiente tabla se comenta el material requerido para las simulaciones, así como su precio:

Tabla 6.1.- Material necesario para la realización del diseño.

Material	Importe (€)
<b>Ordenador preparado para las simulaciones requeridas</b>	1.000
<b>Impresora</b>	60
<b>Programa de elementos finitos (FEMM)</b>	0
<b>Paquete Microsoft Office Profesional 2019</b>	579
<b>Licencia anual AutoCAD 2019</b>	2.124
<b>TOTAL</b>	<b>3.763,00</b>

Respecto al coste del desarrollo del proyecto se tienen los siguientes datos:

Tabla 6.2.- Costes del trabajo ingenieril.

Trabajo	Precio (€/h)	Horas (h)	Importe (€)
<b>Búsqueda de información previa</b>	30	40	1.200
<b>Determinación del diseño óptimo</b>	30	120	3.600
<b>Simulaciones</b>	15	100	1.500
<b>Valoración de los resultados</b>	30	40	1.200

<b>Redactado de la memoria</b>	15	50	750
<b>TOTAL</b>		<b>350</b>	<b>8.250,00</b>

Una vez mencionadas las horas de trabajo, se procede al cálculo de la amortización del ordenador, así como de los programas informáticos. Esto se hace ya que el ordenador tiene una vida útil de aproximadamente cinco años y, por lo tanto, no se puede asignar todo su coste al presupuesto de proyecto.

Se estima que al año se utiliza el ordenador 1.800 horas. Al tener una vida útil de 5 años, esto equivale a 9.000 horas de uso para 5 años. Para el proyecto se dedican 350 horas. Por lo tanto, si el precio del ordenador es de 1.060 €, añadiendo el precio de la impresora, para 9.000 horas el coste del ordenador para el proyecto es de 41,2 €.

Respecto al programa Microsoft office se estima también un uso de 1.000 horas al año. Al comprar la licencia de office, ésta no tiene caducidad. Aun así, se estima que, su vida útil es de 5 años también. Por lo tanto, para 5 años se utilizarán 5000 horas de uso y para el proyecto (350 h), se invertirán 40,53 €.

Para el último software, AutoCAD, la licencia es anual, por lo tanto, la vida útil es de 1 año. Estimando que también se utilizaran 1000 horas de uso al año, el precio del software para el proyecto es de 350 €.

En la siguiente tabla se resumen el coste final del material:

*Tabla 6.3.- Coste del material asignado al proyecto*

<b>Material</b>	<b>Importe (€)</b>
<b>Ordenador + impresora</b>	41,20
<b>Paquete Microsoft Office Profesional 2019</b>	40,53
<b>Licencia anual AutoCAD 2019</b>	350
<b>TOTAL</b>	<b>431,73</b>

A continuación, se detalla el presupuesto y material requerido para la realización de un prototipo del motor lineal.

Para determinar la masa necesaria se utiliza la fórmula de la densidad:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

donde:

$\rho$  es la densidad del material ( $\text{kg/m}^3$ )

$m$  es la masa del material (kg)

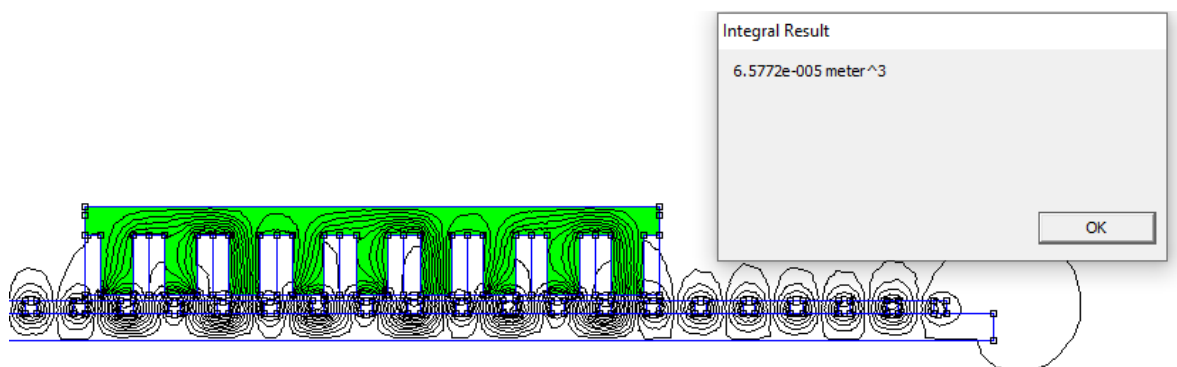
$V$  es el volumen del material ( $\text{m}^3$ )

Las diferentes densidades se encuentran a partir de la siguiente figura:

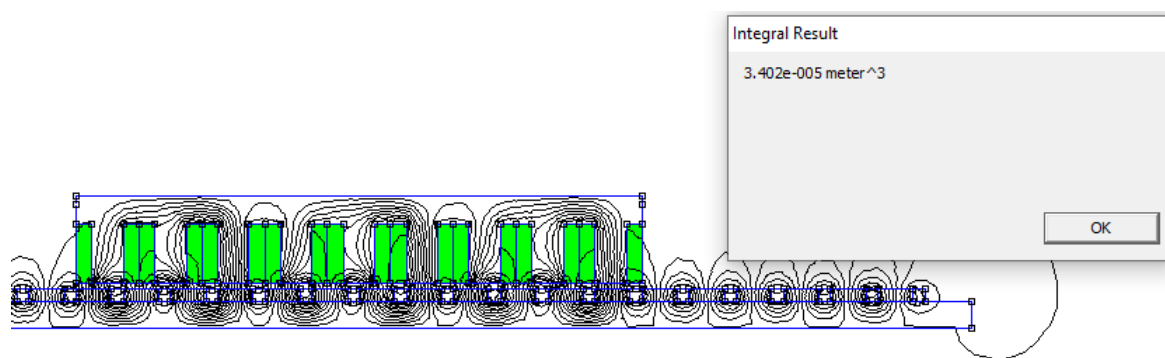
Material	$\rho$ $\text{ohm}\cdot\text{m} \times 10^{-8}$	$k$ (W/m K)	Sp. Heat $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	Density $\text{kg/m}^3$
Copper	1.72	360	0.38	8950
Aluminium	2.8	220	0.90	2700
0.1% Carbon steel	14	52	0.45	7850
Silicon steel	30-50	20-30	0.49	7700
Cast iron	66	45	0.5	7900
Cobalt-iron	40	30	0.42	8000
Ceramic magnet	$10^4$	4.5	0.8	4900
Re-Co magnet	50	10	0.37	8300
NdFeB magnet	160	9	0.42	7400

**Figura 6.1.-** Propiedades eléctricas, térmicas y densidades para diferentes materiales. [16]

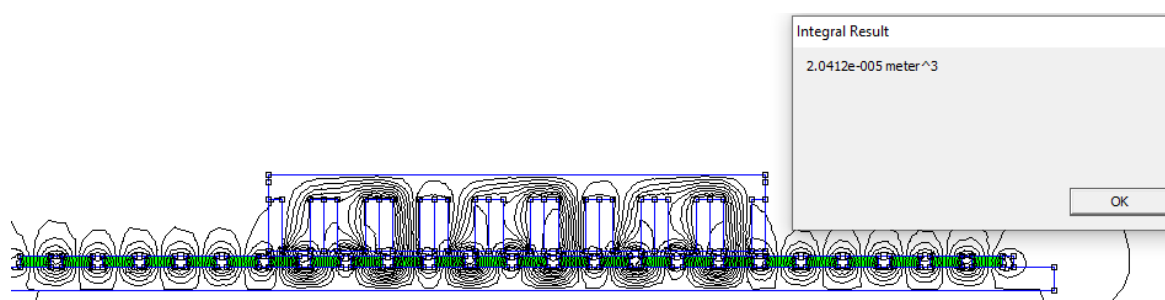
Respecto al volumen, se determina mediante FEMM y la opción del cálculo de la integral de volumen.



**Figura 6.2.-** Volumen para la parte móvil o armature. [Fuente propia]



**Figura 6.3.-** Volumen para el devanado o cobre. [Fuente propia]



**Figura 6.4.-** Volumen para los imanes. [Fuente propia]

Por lo tanto, utilizando la ecuación 6.1 y la información obtenida de las figuras 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 se encuentra la masa necesaria.

En el caso de la plancha, se utiliza acero al silicio. Éste está constituido por láminas con un es pesor de 0,5 milímetros [18]. Por lo tanto, harán falta 44 láminas con unas dimensiones de 144 x 39 x 0,5. El precio de cada lamina es de 1 €.

*Tabla 6.4- Costes de fabricación del prototipo.*

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Massa (kg)	Precio (€/kg)	Importe (€)
Plancha (acero al silicio)	7700	$6,577 \cdot 10^{-5}$	0,506	-	44
Imanes	7400	$2,041 \cdot 10^{-5}$	0,151	80	12,08
Cobre	8950	$3,402 \cdot 10^{-5}$	0,304	8	2,43
Material Auxiliar (tornillos,	-	-	-	-	80



arandelas, plástico...)					
<b>Mano de obra (30 h)</b>	-	-	-	-	800
<b>TOTAL</b>					<b>938,51</b>

Tabla 6.5.- Costes de fabricación totales

Descripción	Importe (€)
<b>Subtotal (sin IVA)</b>	938,51
<b>Beneficio Industrial (7 %)</b>	65,7
<b>Total (sin IVA)</b>	1.004,21
<b>TOTAL (21 % IVA)</b>	<b>1.215,09</b>

El presupuesto para la fabricación del prototipo es de 1215,09 €.

Por lo tanto, el presupuesto total contando costes de material, costes ingenieriles y costes de fabricación es el siguiente:

Tabla 6.6.- Costes de fabricación totales

Descripción	Importe (€)
<b>Costes de material</b>	431,73
<b>Costes Ingenieriles</b>	8.250,00
<b>Costes de fabricación del prototipo</b>	1.215,09
<b>TOTAL (21 % IVA)</b>	<b>9896,82</b>

En resumen, el presupuesto para la realización del diseño del motor, así como de su fabricación es de nueve mil ochocientos noventa y seis euros con ochenta y dos céntimos.



## 7. Conclusiones

Partiendo de las motivaciones y necesidades respecto a las máquinas eléctricas. En este trabajo, se ha empezado explicando brevemente los tipos de motores eléctricos lineales, tipologías y métodos de excitación. Una vez realizado ésta introducción teórica, se ha proseguido a explicar el método o procedimiento de diseño seguido para este proyecto.

Ha sido en el apartado de análisis electromagnético donde se ha mostrado, desarrollado y explicado la gran parte del trabajo. Empezando por un dimensionamiento inicial, viendo el comportamiento de éste y optimizando la máquina hasta encontrar la que se suponía iba a ser la geometría definitiva. Con esta geometría o dimensionamiento se realizó el análisis electromagnético haciendo un estudio en vacío, de los armónicos, de la fuerza de cogging, estudio en carga en función de la posición y del tiempo. A partir del estudio de la fuerza de cogging, se vio que se podía optimizar aún más el motor. Una de las posibles soluciones era añadir inclinación a los imanes. Esta opción fue descartada ya que al utilizar un programa de elementos finitos en 2D era bastante complicado crear esta inclinación. Se optó entonces por añadir espacio o aire entre los imanes. Como se comprobó en el apartado 4.4, después de hacer un estudio para diferentes espaciados, la mejor opción fue la de añadir tres milímetros de separación. Por lo tanto, después de muchas iteraciones para diferentes geometrías, se encontró la geometría definitiva donde se redujo la fuerza de cogging en un 50 %, obteniendo así unas formas de ondas más sinusoidales, en otras palabras, teniendo menos pérdidas. Como consecuencia de ello se tuvo que alimentar la máquina con una corriente ligeramente más alta (0,2 A). Una vez hecho el análisis electromagnético y observando que corrientes eran necesarias para obtener la fuerza máxima (200 N) se realizó un breve análisis térmico.

Para éste fue necesario el cálculo del coeficiente de convección a partir de una fórmula válida para nuestro tipo de motor. Calculado éste y haciendo la configuración optima, se realizó la simulación térmica obteniendo un resultado bastante positivo ya que el motor trabajando en el peor caso llega a temperaturas del orden de los 90 °. Por lo tanto, con un aislamiento de clase A es suficiente para nuestra máquina.

Para finalizar se ha realizado un estudio del presupuesto necesario para el diseño y fabricación del motor llegando a la conclusión que son necesarios nueve mil ochocientos noventa y seis euros con ochenta y dos céntimos para la ejecución de éste proyecto.



## Referencias y Bibliografía

- [1] H.Tiegna, Y. amara, G. Barakat; “Overview of analytical models of permanent magnet electrical machines for analysis and design purposes” January, 2013.
- [2] J.F. Gieras, Z.J Piech; “Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems” Florida: CRC Press, 2000.
- [3] J. Jiménez Pérez; “Diseño de Motores Lineales Síncronos Miniaturizados para el Accionamiento de Puertas Automáticas” Tesis doctoral, Tecnun Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Navarra, San Sebastián, España, 2013.
- [4] L. Yan, L. Zhang, J. Peng, L. Zhang, Z. Jiao; “Electromagnetic Linear Machines with Dual Halbach Array” Singapore: Springer, 2017.
- [5] J. Fraile; “Máquinas Eléctricas” Madrid; Ibergarceta Publicaciones, 2015.
- [6] J. Fraile Mora, J. Fraile Ardanuy; “Accionamientos Eléctricos” Madrid:Ibergarceta Publicaiones, 2016.
- [7] S. Chevailler; “Comparative study and selection criteria of linear motors” PhD thesis, Ecole Polytechnique Feredale de Lausanne, Suiza, 2016.
- [8] “Concentred & Distributed Windings” [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/post/what\\_is\\_the\\_difference\\_between\\_stator\\_windings\\_of\\_BLDC\\_and\\_PMSM\\_motors](https://www.researchgate.net/post/what_is_the_difference_between_stator_windings_of_BLDC_and_PMSM_motors). [Accessed 27-Dec-2019]
- [9] R. Bargallo; “Consideraciones sobre el cálculo térmico” Barcelona: 2009.
- [10] V.Ganesh, K. Abhishek, N. Lenin; “Design and Development of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM), India, July 2017.
- [11] J. Jansen, P. Smeets, T. Overboom, J. Rovers, E. Lomonova; “Overview of Analytical Models for Design of Linear and Planar Motors”, Eindhoven, November 2014.
- [12] X. Wang, K. Cao, H. Feng, L. Guo, X. Xu; “Design and Analysis of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Special Pole Shape” China, February 2013.
- [13] N. Govindpure, R. Hipparagi, A. Kumar; “Basic Design equations of Linear Electric Machines”, India.
- [14] R. Bargalló, “General Equations for Electric Machines Sizing”, Barcelona, 2009.

[15] R. Bargalló, “Winding Design”, Barcelona, 2013.

[16] R. Bargalló, “Heating/Cooling of Electrical Machines”, Barcelona, 2013.

[17] “SPEED’s Electric Machines with problems and solutions”

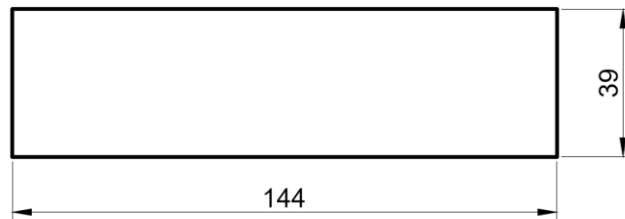
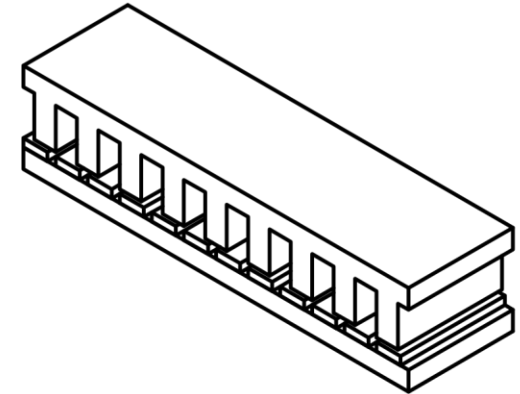
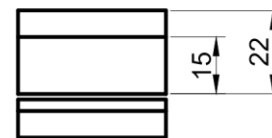
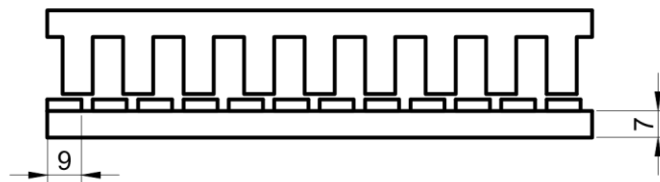
[18] “Especificaciones de acero al silicio” [Online] Available: <https://www.yieh.com/es/silicon-steel-2>.  
[Acccesed 13-01-2020].


## Planos

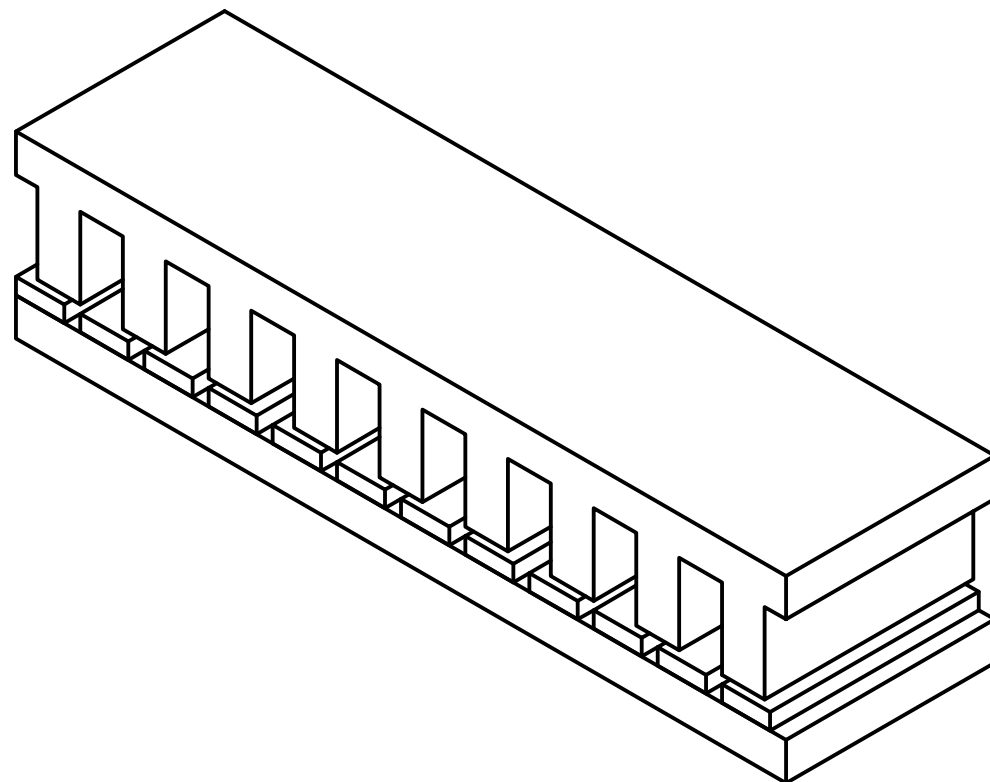





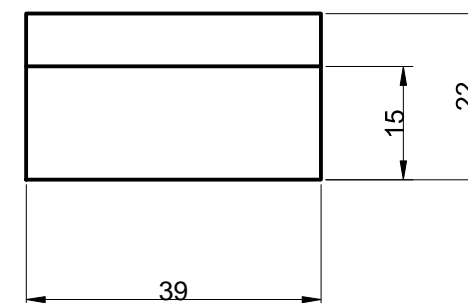
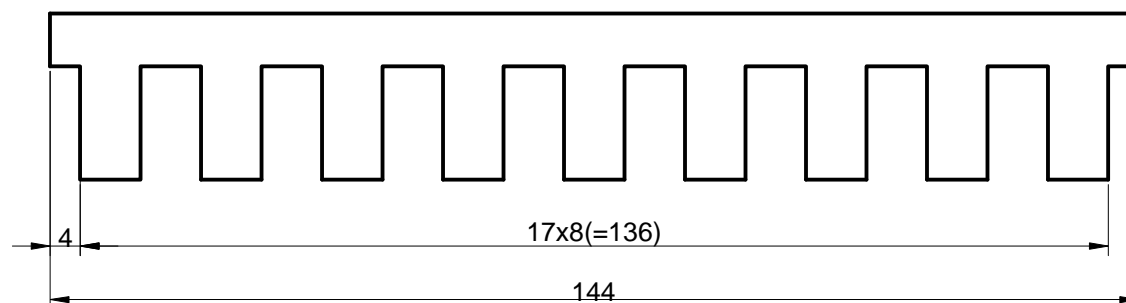
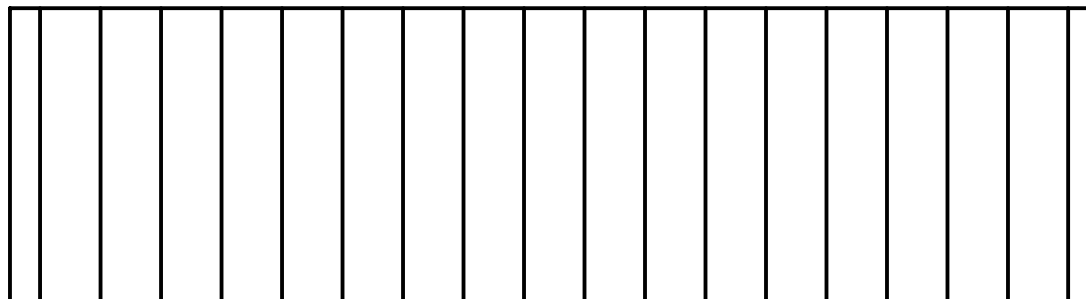





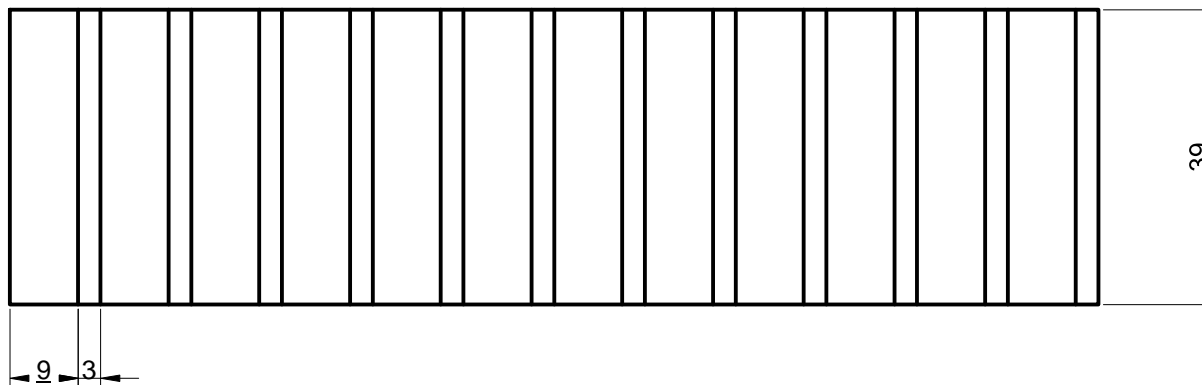
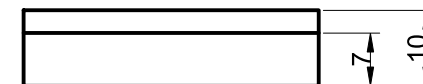
	Fecha	Nombre	Firmas Juan Romero	Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	
Dibujado	12-01-2020	Juan			
Comprobado					
Según normas		UNE-DIN			
Escala	Alzado, planta y vista lateral izquierda del motor síncrono lineal			Nº:	
1:2					
				Sustituye a:	
				Sustituido por:	




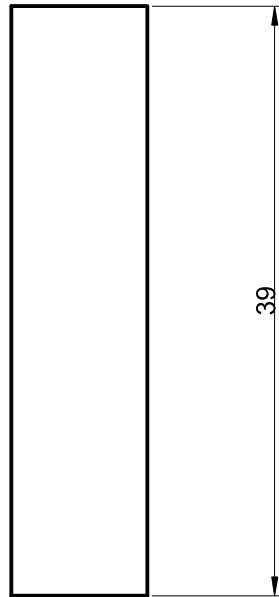
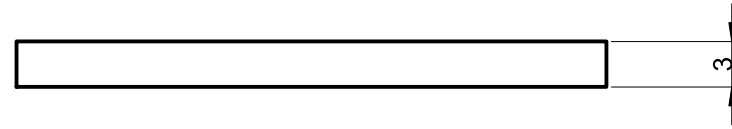
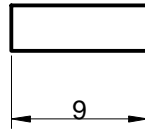
	Fecha	Nombre	Firmas Juan Romero	Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	
Dibujado	12-01-2020	Juan			
Comprobado					
Según normas		UNE-DIN			
Escala  1:1	Vista en 3D del motor síncrono lineal			Nº:  Sustituye a: Sustituido por:	




	Fecha	Nombre	Firmas Juan Romero	Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	
Dibujado	12-01-2020	Juan			
Comprobado					
Según normas		UNE-DIN			
Escala	Alzado, vista inferior y vista lateral izquierda de la parte móvil o <i>armature</i> del motor síncrono lineal				Nº:
1:1					Sustituye a:
					Sustituido por:



	Fecha	Nombre	Firmas Juan Romero	Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	
Dibujado	12-01-2020	Juan			
Comprobado					
Según normas		UNE-DIN			
Escala	Alzado, planta y vista lateral izquierda del rail de reacción o secundario del motor síncrono lineal				Nº:
1:1					Sustituye a:
					Sustituido por:



	Fecha	Nombre	Firmas Juan Romero	Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	
Dibujado	12-01-2020	Juan			
Comprobado					
Según normas		UNE-DIN			
Escala	Alzado, planta y vista lateral izquierda de los imanes del motor síncrono lineal				Nº:
2:1					Sustituye a:
					Sustituido por:

## Anexos





## Anexo 1 Códigos en Lua para la automatización de las simulaciones

### Análisis en vacío

```
mi_saveas("temp2.fem");
handle=openfile("vacio.txt","a");
write(handle,"posición          ", "Flux A          ", "Flux B          ", "Flux C
", "\n");
closefile(handle);
posfin=48;
step=1;
for x=1,posfin,step do
    mi_analyze();
    mi_loadsolution();
    handle=openfile("Fvacio.txt","a");
    ia,va,fa=mo_getcircuitproperties("A");
    ib,vb,fb=mo_getcircuitproperties("B");
    ic,vc,fc=mo_getcircuitproperties("C");
    pos=(x-1)*step;
    write(handle,pos,"      ",fa,"      ",fb,"      ",fc,"\n");
    closefile(handle);
    mi_seteditmode("group");
    mi_selectgroup(1);
    mi_movetranslate(1,0,4);
end
```



### Análisis de la fuerza de cogging

```

mi_saveas("temp2.fem");
handle=fopen("Fcogging.txt","a");
write(handle,"posición          ", "Fcog          ", "Flux A          ", "Flux B          ");
write(handle,"Flux C          ", "\n");
fclose(handle);
posfin=48;
step=1;
for x=0,posfin,step do
    mi_analyze();
    mi_loadsolution();
    handle=fopen("Fcogging.txt","a");
    ia,va,fa=mo_getcircuitproperties("A");
    ib,vb,fb=mo_getcircuitproperties("B");
    ic,vc,fc=mo_getcircuitproperties("C");
    mo_groupselectblock(1);
    Fcog=mo_blockintegral(18);
    mo_clearblock();
    pos=(x-1)*step;
    write(handle,pos,"          ",Fcog,"          ",fa,"          ",fb,"          ",fc,"          ", "\n");
    fclose(handle);
    mi_seteditmode("group");
    mi_selectgroup(1);
    mi_movetranslate(1,0,4);
end

```

### Análisis en carga, F(x)

```

mi_saveas("temp2.fem");
handle=fopen("Fcarrega.txt","a");
write(handle,"posición      ", "F      ", "Flux A      ", "Flux B
", "Flux C      ", "\n");
closefile(handle);
posfin=48;
step=1;
for x=0,posfin,step do
    mi_analyze();
    mi_loadsolution();
    handle=fopen("Fcarrega.txt","a");
    ia,va,fa=mo_getcircuitproperties("A");
    ib,vb,fb=mo_getcircuitproperties("B");
    ic,vc,fc=mo_getcircuitproperties("C");
    mo_groupselectblock(1);
    F=mo_blockintegral(18);
    mo_clearblock();
    pos=(x-1)*step;
    write(handle,pos,"      ",F,"      ",fa,"      ",fb,"      ",fc,"\\n");
    closefile(handle);
    mi_seteditmode("group");
    mi_selectgroup(1);
    mi_movetranslate(1,0,4);
end

```

### Análisis en carga F(t) 200 N

```

mi_saveas("temp5.fem");
handle=fopen("Fmovi.txt","a");
write(handle,"posicion","Fmovi","FLux A","FLux B","FLux C","Ia","Ib","Ic\n");
fclose(handle);
Imax=2;
p=12;
pi=3.14159;
tau=12;
deltax=1;
posfin=2*tau;

for n=1,posfin,deltax do
    x=(n-1)*deltax;
    angle=(2*pi*x/24);
    Ia=Imax*cos(angle);
    Ib=Imax*cos(angle-(2*pi/3));
    Ic=Imax*cos(angle+(2*pi/3));
    mi_modifycircprop("A",1,Ia);
    mi_modifycircprop("B",1,Ib);
    mi_modifycircprop("C",1,Ic);
    mi_analyze(1);
    mi_loadsolution();
    handle=fopen("Fmovi.txt","a");
    mo_groupselectblock(1);
    Fmovi=mo_blockintegral(18);
    mo_clearblock();
    ia,va,fa=mo_getcircuitproperties("A");
    ib,vb,fb=mo_getcircuitproperties("B");
    ic,vc,fc=mo_getcircuitproperties("C");
    pos=(n-1)*deltax;
    write(handle,pos,"",Fmovi,"",fa,"",fb,"",fc,"",ia,"",ib,"",ic,"\\n");
    fclose(handle);
    print(pos,"",Fmovi);
    mo_close();
    mi_seteditmode("group");
    mi_selectgroup(1);
    mi_movetranslate(1,0,4);
end

```

**Análisis en carga F(t) 80 N**

```

mi_saveas("temp5.fem");
handle=fopen("Fmovi.txt","a");
write(handle,"posicion","Fmovi","FLux A","FLux B","FLux C","Ia","Ib","Ic\n");
closefile(handle);
Imax=0.8;
p=12;
pi=3.14159;
tau=12;
deltax=1;
posfin=2*tau;

for n=1,posfin,deltax do
    x=(n-1)*deltax;
    angle=(2*pi*x/24);
    Ia=Imax*cos(angle);
    Ib=Imax*cos(angle-(2*pi/3));
    Ic=Imax*cos(angle+(2*pi/3));
    mi_modifycircprop("A",1,Ia);
    mi_modifycircprop("B",1,Ib);
    mi_modifycircprop("C",1,Ic);
    mi_analyze(1);
    mi_loadsolution();
    handle=fopen("Fmovi.txt","a");
    mo_groupselectblock(1);
    Fmovi=mo_blockintegral(18);
    mo_clearblock();
    ia,va,fa=mo_getcircuitproperties("A");
    ib,vb,fb=mo_getcircuitproperties("B");
    ic,vc,fc=mo_getcircuitproperties("C");
    pos=(n-1)*deltax;
    write(handle,pos,"",Fmovi,"",fa,"",fb,"",fc,"",ia,"",ib,"",ic,"");
    closefile(handle);
    print(pos,"",Fmovi);
    mo_close();
    mi_seteditmode("group");
    mi_selectgroup(1);
    mi_movetranslate(1,0,4);
end

```



## Anexo 2 Datos obtenidos en las simulaciones para la obtención de las gráficas

Tabla A.1 -. Flujos A, B y C en función de la posición del motor.

posición (mm)	Flujo A	Flujo B	Flujo C
0	0,157798	0,059975	-0,21988
1	0,110053	0,115618	-0,22853
2	0,055349	0,164195	-0,22134
3	-0,00295	0,202224	-0,19858
4	-0,06122	0,22647	-0,1621
5	-0,11508	0,234605	-0,11532
6	-0,16189	0,226454	-0,06127
7	-0,19833	0,202387	-0,00306
8	-0,22111	0,164279	0,055436
9	-0,22819	0,11593	0,109963
10	-0,21941	0,060159	0,157862
11	-0,1951	0,000336	0,195721
12	-0,15726	-0,05958	0,220085
13	-0,10949	-0,1152	0,228837
14	-0,05477	-0,16366	0,221664
15	0,003618	-0,2017	0,198956
16	0,061925	-0,22585	0,162461
17	0,11583	-0,23397	0,115792
18	0,162674	-0,22572	0,061733
19	0,199188	-0,2016	0,003549
20	0,221916	-0,16347	-0,05482
21	0,229151	-0,11509	-0,10934
22	0,220377	-0,05923	-0,15721
23	0,196185	0,000573	-0,19504
24	0,158351	0,060559	-0,21936
25	0,110598	0,116226	-0,22805
26	0,055923	0,164786	-0,22078
27	-0,00236	0,202838	-0,19804
28	-0,06057	0,227032	-0,1615
29	-0,11442	0,235252	-0,11484
30	-0,16119	0,227084	-0,06075
31	-0,19767	0,203024	-0,0025
32	-0,22035	0,164974	0,05591
33	-0,22745	0,116591	0,110516
34	-0,21867	0,060877	0,158405
35	-0,19438	0,001086	0,196279

36	-0,15644	-0,05887	0,220659
37	-0,10865	-0,11443	0,229368
38	-0,05391	-0,1629	0,222188
39	0,004451	-0,20088	0,1995
40	0,062804	-0,22503	0,163018
41	0,116707	-0,23311	0,116348
42	0,163617	-0,22482	0,062247
43	0,200149	-0,2007	0,004129
44	0,222954	-0,16256	-0,05426
45	0,230179	-0,1141	-0,10881
46	0,221484	-0,05828	-0,15666
47	0,197286	0,001651	-0,19445
48	0,159551	0,061683	-0,21882

Tabla A.2.- Diferencial de flujo en milímetros en función de la posición.

posición (mm)	dflujo A (wb/mm)	dflujo B (wb/mm)	dflujo C (wb/mm)
0	-0,037760651	6,00E-02	-0,024353481
1	-0,047745564	5,56E-02	-0,008655007
2	-0,054703594	4,86E-02	0,007195657
3	-0,058295329	3,80E-02	0,022754462
4	-0,058274341	2,42E-02	0,036479644
5	-0,053859584	8,13E-03	0,04678705
6	-0,046809335	-8,15E-03	0,054046308
7	-0,036440031	-2,41E-02	0,058208971
8	-0,022775884	-3,81E-02	0,058497526
9	-0,007088691	-4,83E-02	0,054526976
10	0,008786335	-5,58E-02	0,047899717
11	0,024309486	-5,98E-02	0,037859075
12	0,037839498	-5,99E-02	0,024364058
13	0,047773628	-5,56E-02	0,008751419
14	0,054716557	-4,85E-02	-0,007172667
15	0,058387032	-3,80E-02	-0,022707732
16	0,058306585	-2,41E-02	-0,036495939
17	0,053904832	-8,12E-03	-0,046668847
18	0,046843767	8,25E-03	-0,054058361
19	0,036514725	2,41E-02	-0,058183944
20	0,022727934	3,81E-02	-0,058367411
21	0,007235177	4,84E-02	-0,054519122
22	-0,008774732	5,59E-02	-0,047872747
23	-0,024191537	5,98E-02	-0,037834167

24	-0,037834435	6,00E-02	-0,024313917
25	-0,047752602	5,57E-02	-0,008690138
26	-0,05467464	4,86E-02	0,00726709
27	-0,058283484	3,81E-02	0,022736982
28	-0,058206649	2,42E-02	0,036549058
29	-0,053853466	8,22E-03	0,046658025
30	-0,046771724	-8,17E-03	0,054087353
31	-0,036473392	-2,41E-02	0,058248838
32	-0,022682815	-3,81E-02	0,05841075
33	-0,007100227	-4,84E-02	0,05460631
34	0,008776643	-5,57E-02	0,047888989
35	0,024294333	-5,98E-02	0,0378734
36	0,037932717	-6,00E-02	0,024379858
37	0,047795094	-5,56E-02	0,0087093
38	0,054743135	-4,85E-02	-0,007179761
39	0,05835718	-3,80E-02	-0,022687678
40	0,058352797	-2,41E-02	-0,036482095
41	0,053903204	-8,08E-03	-0,046670654
42	0,046910611	8,29E-03	-0,054100985
43	0,036531464	2,41E-02	-0,058117304
44	0,022805035	3,81E-02	-0,058390595
45	0,007224876	4,85E-02	-0,054547327
46	-0,008695017	5,58E-02	-0,047854656
47	-0,024198153	5,99E-02	-0,037790981
48	-0,03773447	6,00E-02	-0,024364665

Tabla A.3.- Diferencial de flujo en función de la posición metros.

Posición (mm)	dfluxA (wb/m)	dfluxB (wb/m)	dfluxC (wb/m)
0	-37,76	59,96	-24,35
1	-47,75	55,64	-8,66
2	-54,70	48,58	7,20
3	-58,30	38,03	22,75
4	-58,27	24,25	36,48
5	-53,86	8,13	46,79
6	-46,81	-8,15	54,05
7	-36,44	-24,07	58,21
8	-22,78	-38,11	58,50
9	-7,09	-48,35	54,53
10	8,79	-55,77	47,90



11	24,31	-59,82	37,86
12	37,84	-59,91	24,36
13	47,77	-55,63	8,75
14	54,72	-48,46	-7,17
15	58,39	-38,04	-22,71
16	58,31	-24,15	-36,50
17	53,90	-8,12	-46,67
18	46,84	8,25	-54,06
19	36,51	24,12	-58,18
20	22,73	38,13	-58,37
21	7,24	48,38	-54,52
22	-8,77	55,86	-47,87
23	-24,19	59,80	-37,83
24	-37,83	59,99	-24,31
25	-47,75	55,67	-8,69
26	-54,67	48,56	7,27
27	-58,28	38,05	22,74
28	-58,21	24,19	36,55
29	-53,85	8,22	46,66
30	-46,77	-8,17	54,09
31	-36,47	-24,06	58,25
32	-22,68	-38,05	58,41
33	-7,10	-48,38	54,61
34	8,78	-55,71	47,89
35	24,29	-59,79	37,87
36	37,93	-59,95	24,38
37	47,80	-55,56	8,71
38	54,74	-48,47	-7,18
39	58,36	-37,98	-22,69
40	58,35	-24,15	-36,48
41	53,90	-8,08	-46,67
42	46,91	8,29	-54,10
43	36,53	24,12	-58,12
44	22,81	38,13	-58,39
45	7,22	48,46	-54,55
46	-8,70	55,82	-47,85
47	-24,20	59,93	-37,79
48	-37,73	60,03	-24,36

*Tabla A.4.- Fuerza electromotriz en función de la posición.*

posición (mm)	Ea (V)	Eb (V)	Ec (V)
0	-37,76	59,96	-24,35
1	-47,75	55,64	-8,66
2	-54,70	48,58	7,20
3	-58,30	38,03	22,75
4	-58,27	24,25	36,48
5	-53,86	8,13	46,79
6	-46,81	-8,15	54,05
7	-36,44	-24,07	58,21
8	-22,78	-38,11	58,50
9	-7,09	-48,35	54,53
10	8,79	-55,77	47,90
11	24,31	-59,82	37,86
12	37,84	-59,91	24,36
13	47,77	-55,63	8,75
14	54,72	-48,46	-7,17
15	58,39	-38,04	-22,71
16	58,31	-24,15	-36,50
17	53,90	-8,12	-46,67
18	46,84	8,25	-54,06
19	36,51	24,12	-58,18
20	22,73	38,13	-58,37
21	7,24	48,38	-54,52
22	-8,77	55,86	-47,87
23	-24,19	59,80	-37,83
24	-37,83	59,99	-24,31
25	-47,75	55,67	-8,69
26	-54,67	48,56	7,27
27	-58,28	38,05	22,74
28	-58,21	24,19	36,55
29	-53,85	8,22	46,66
30	-46,77	-8,17	54,09
31	-36,47	-24,06	58,25
32	-22,68	-38,05	58,41
33	-7,10	-48,38	54,61
34	8,78	-55,71	47,89
35	24,29	-59,79	37,87
36	37,93	-59,95	24,38
37	47,80	-55,56	8,71
38	54,74	-48,47	-7,18
39	58,36	-37,98	-22,69

40	58,35	-24,15	-36,48
41	53,90	-8,08	-46,67
42	46,91	8,29	-54,10
43	36,53	24,12	-58,12
44	22,81	38,13	-58,39
45	7,22	48,46	-54,55
46	-8,70	55,82	-47,85
47	-24,20	59,93	-37,79
48	-37,73	60,03	-24,36

Tabla A.5.- Coeficientes para la onda fundamental, 1º armónico.

A1	B1	Flujo 1
0,000000	0,157798	0,165893
0,028484	0,106303	0,118961
0,027675	0,047934	0,064197
-0,002083	-0,002083	0,005332
-0,053019	-0,030610	-0,053622
-0,111159	-0,029785	-0,108647
-0,161890	0,000000	-0,155993
-0,191572	0,051331	-0,192435
-0,191483	0,110553	-0,215488
-0,161358	0,161358	-0,223582
-0,109704	0,190013	-0,216164
-0,050495	0,188450	-0,193741
0,000000	0,157259	-0,157840
0,028337	0,105755	-0,110909
0,027384	0,047431	-0,056145
-0,002559	-0,002559	0,002720
-0,053629	-0,030962	0,061674
-0,111883	-0,029979	0,116699
-0,162674	0,000000	0,164046
-0,192401	0,051554	0,200487
-0,192185	0,110958	0,223540
-0,162035	0,162035	0,231634
-0,110188	0,190852	0,224216
-0,050776	0,189500	0,201793
0,000000	0,158351	0,165893
0,028625	0,106830	0,118961
0,027962	0,048431	0,064197
-0,001669	-0,001669	0,005332
-0,052452	-0,030283	-0,053622

-0,110521	-0,029614	-0,108647
-0,161192	0,000000	-0,155993
-0,190930	0,051160	-0,192435
-0,190827	0,110174	-0,215488
-0,160830	0,160830	-0,223582
-0,109336	0,189375	-0,216164
-0,050309	0,187754	-0,193741
0,000000	0,156445	-0,157840
0,028121	0,104947	-0,110909
0,026953	0,046684	-0,056145
-0,003147	-0,003147	0,002720
-0,054390	-0,031402	0,061674
-0,112730	-0,030206	0,116699
-0,163617	0,000000	0,164046
-0,193329	0,051802	0,200487
-0,193084	0,111477	0,223540
-0,162761	0,162761	0,231634
-0,110742	0,191811	0,224216
-0,051061	0,190563	0,201793
0,000000	0,159551	0,165893

Tabla A.6.- Coeficientes para la onda fundamental, 3º armónico.

A3	B3	Flujo 3
0,000000	0,157798	0,009752
0,077819	0,077819	0,007460
0,055349	0,000000	0,003156
-0,002083	0,002083	-0,000638
0,000000	0,061221	-0,001700
0,081374	0,081374	0,000593
0,161890	0,000000	0,004897
0,140240	-0,140240	0,008691
0,000000	-0,221105	0,009752
-0,161358	-0,161358	0,007460
-0,219408	0,000000	0,003156
-0,137955	0,137955	-0,000638
0,000000	0,157259	-0,001700
0,077418	0,077418	0,000593
0,054769	0,000000	0,004897
-0,002559	0,002559	0,008691
0,000000	0,061925	0,009752
0,081904	0,081904	0,007460

0,162674	0,000000	0,003156
0,140847	-0,140847	-0,000638
0,000000	-0,221916	-0,001700
-0,162035	-0,162035	0,000593
-0,220377	0,000000	0,004897
-0,138724	0,138724	0,008691
0,000000	0,158351	0,009752
0,078205	0,078205	0,007460
0,055923	0,000000	0,003156
-0,001669	0,001669	-0,000638
0,000000	0,060567	-0,001700
0,080907	0,080907	0,000593
0,161192	0,000000	0,004897
0,139770	-0,139770	0,008691
0,000000	-0,220348	0,009752
-0,160830	-0,160830	0,007460
-0,218672	0,000000	0,003156
-0,137446	0,137446	-0,000638
0,000000	0,156445	-0,001700
0,076827	0,076827	0,000593
0,053906	0,000000	0,004897
-0,003147	0,003147	0,008691
0,000000	0,062804	0,009752
0,082524	0,082524	0,007460
0,163617	0,000000	0,003156
0,141527	-0,141527	-0,000638
0,000000	-0,222954	-0,001700
-0,162761	-0,162761	0,000593
-0,221484	0,000000	0,004897
-0,139502	0,139502	0,008691
0,000000	0,159551	0,009752

Tabla A.7.- Coeficientes para la onda fundamental, 5º armónico.

A5	B5	Flujo 5
0,000000	0,157798	0,010451
0,106303	0,028484	0,005700
0,027675	-0,047934	-0,001532
0,002083	0,002083	-0,000524
0,053019	-0,030610	0,007229
-0,029785	-0,111159	0,010235
-0,161890	0,000000	0,004037



-0,051331	0,191572	-0,002176
0,191483	0,110553	0,000804
0,161358	-0,161358	0,008561
-0,109704	-0,190013	0,009595
-0,188450	0,050495	0,002374
0,000000	0,157259	-0,002398
0,105755	0,028337	0,002353
0,027384	-0,047431	0,009584
0,002559	0,002559	0,008577
0,053629	-0,030962	0,000824
-0,029979	-0,111883	-0,002182
-0,162674	0,000000	0,004015
-0,051554	0,192401	0,010229
0,192185	0,110958	0,007248
0,162035	-0,162035	-0,000509
-0,110188	-0,190852	-0,001543
-0,189500	0,050776	0,005678
0,000000	0,158351	0,010451
0,106830	0,028625	0,005700
0,027962	-0,048431	-0,001532
0,001669	0,001669	-0,000524
0,052452	-0,030283	0,007229
-0,029614	-0,110521	0,010235
-0,161192	0,000000	0,004037
-0,051160	0,190930	-0,002176
0,190827	0,110174	0,000804
0,160830	-0,160830	0,008561
-0,109336	-0,189375	0,009595
-0,187754	0,050309	0,002374
0,000000	0,156445	-0,002398
0,104947	0,028121	0,002353
0,026953	-0,046684	0,009584
0,003147	0,003147	0,008577
0,054390	-0,031402	0,000824
-0,030206	-0,112730	-0,002182
-0,163617	0,000000	0,004015
-0,051802	0,193329	0,010229
0,193084	0,111477	0,007248
0,162761	-0,162761	-0,000509
-0,110742	-0,191811	-0,001543
-0,190563	0,051061	0,005678
0,000000	0,159551	0,010451

Tabla A.8.- Coeficientes para la onda fundamental, 7º armónico.

A7	B7	Flujo 7
0,000000	0,157798	0,010400
0,106303	-0,028484	0,002253
-0,027675	-0,047934	-0,001430
0,002083	-0,002083	0,008623
-0,053019	-0,030610	0,007103
-0,029785	0,111159	-0,002163
0,161890	0,000000	0,004154
-0,051331	-0,191572	0,010150
-0,191483	0,110553	0,000729
0,161358	0,161358	-0,000391
0,109704	-0,190013	0,009610
-0,188450	-0,050495	0,005553
0,000000	0,157259	-0,002348
0,105755	-0,028337	0,005799
-0,027384	-0,047431	0,009482
0,002559	-0,002559	-0,000571
-0,053629	-0,030962	0,000950
-0,029979	0,111883	0,010216
0,162674	0,000000	0,003899
-0,051554	-0,192401	-0,002097
-0,192185	0,110958	0,007323
0,162035	0,162035	0,008443
0,110188	-0,190852	-0,001557
-0,189500	-0,050776	0,002500
0,000000	0,158351	0,010400
0,106830	-0,028625	0,002253
-0,027962	-0,048431	-0,001430
0,001669	-0,001669	0,008623
-0,052452	-0,030283	0,007103
-0,029614	0,110521	-0,002163
0,161192	0,000000	0,004154
-0,051160	-0,190930	0,010150
-0,190827	0,110174	0,000729
0,160830	0,160830	-0,000391
0,109336	-0,189375	0,009610
-0,187754	-0,050309	0,005553
0,000000	0,156445	-0,002348
0,104947	-0,028121	0,005799

-0,026953	-0,046684	0,009482
0,003147	-0,003147	-0,000571
-0,054390	-0,031402	0,000950
-0,030206	0,112730	0,010216
0,163617	0,000000	0,003899
-0,051802	-0,193329	-0,002097
-0,193084	0,111477	0,007323
0,162761	0,162761	0,008443
0,110742	-0,191811	-0,001557
-0,190563	-0,051061	0,002500
0,000000	0,159551	0,010400

Tabla A.9.- Suma del primer, tercer, quinto y séptimo armónico.

Flujo 1357
0,196496
0,134374
0,064391
0,012793
-0,040990
-0,099983
-0,142906
-0,175771
-0,204202
-0,207952
-0,193803
-0,186452
-0,164286
-0,102164
-0,032181
0,019417
0,073200
0,132192
0,175115
0,207980
0,236412
0,240161
0,226013
0,218662
0,196496
0,134374
0,064391



0,012793
-0,040990
-0,099983
-0,142906
-0,175771
-0,204202
-0,207952
-0,193803
-0,186452
-0,164286
-0,102164
-0,032181
0,019417
0,073200
0,132192
0,175115
0,207980
0,236412
0,240161
0,226013
0,218662
0,196496

Tabla A.10.- Datos obtenidos en vacío para la fuerza de cogging.

Posición (mm)	Fcogging (N)
0	0,159
1	10,918
2	3,645
3	-4,603
4	3,577
5	8,993
6	0,075
7	-11,423
8	-4,103
9	3,842
10	-3,541
11	-10,303
12	-0,442
13	10,736
14	3,573
15	-3,752

16	3,661
17	10,053
18	0,325
19	-11,357
20	-4,140
21	3,244
22	-3,487
23	-11,227
24	0,487

*Tabla A.11.- Datos obtenidos para el motor en carga @ 1,8 A*

Posición (mm)	Fcarga (N)
0	-132,95
1	-168,15
2	-193,33
3	-194,27
4	-179,33
5	-167,69
6	-146,02
7	-99,61
8	-45,12
9	-1,86
10	43,95
11	100,89
12	148,79
13	172,57
14	186,87
15	200,97
16	197,76
17	167,16
18	128,32
19	92,53
20	50,40
21	-6,90
22	-61,73
23	-101,40
24	-132,88
25	-167,81
26	-193,13
27	-193,56
28	-179,90

29	-167,55
30	-145,87
31	-99,99
32	-45,55
33	-1,27
34	44,10
35	101,13
36	148,66
37	172,82
38	186,80
39	201,78
40	198,20
41	167,44
42	128,39
43	92,94
44	50,98
45	-6,51
46	-61,58
47	-101,64
48	-133,50

Tabla A.12.- Análisis en carga para la fuerza nominal, @  $I = 0,7 A$

posición (mm)	Fuerza (N)
0	-40,47
1	-44,36
2	-63,74
3	-78,76
4	-73,80
5	-62,78
6	-67,28
7	-66,28
8	-42,56
9	-15,53
10	-4,70
11	9,51
12	39,91
13	66,25
14	70,80
15	71,27
16	82,27

17	85,59
18	65,12
19	42,87
20	33,17
21	21,41
22	-6,22
23	-32,16
24	-40,08
25	-44,55
26	-63,30
27	-78,58
28	-73,18
29	-63,60
30	-67,00
31	-66,12
32	-42,97
33	-15,55
34	-4,11
35	9,74
36	39,99
37	65,55
38	70,88
39	71,11
40	82,83
41	85,94
42	65,69
43	42,90
44	34,01
45	22,49
46	-5,78
47	-31,94
48	-40,43

Tabla A.13.- Datos obtenidos para la fuerza en función del tiempo.

posición (mm)	F(t)
0	200,97
1	203,66
2	192,44
3	185,79
4	193,92
5	200,44

6	193,77
7	191,67
8	202,51
9	209,15
10	201,32
11	194,83
12	201,19
13	203,41
14	192,30
15	185,01
16	193,61
17	200,42
18	193,92
19	191,61
20	202,90
21	209,24
22	201,58
23	194,66
24	201,78

Tabla A.14.- Valores obtenidos para la fuerza en función del tiempo, carga nominal @  $I=0,7\text{ A}$

Posición (mm)	F(t) (N)
0	93,39
1	99,01
2	86,14
3	76,53
4	84,19
5	91,75
6	84,20
7	79,24
8	91,25
9	101,66
10	93,30
11	85,47
12	93,66
13	98,62
14	86,05
15	75,60
16	84,01
17	92,49

18	84,12
19	79,27
20	91,42
21	100,46
22	93,11
23	85,34

